

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky**

**Měření atmosférických vlivů na optický svazek**

**The Measurment of the Atmospheric Phenomena Influenece  
of the Optical Light Beam**

**2015**

**Daniel Palička**

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Daniel Palička**

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2612R059 Mobilní technologie

Téma:

Měření vlivu atmosférických jevů na optický svazek  
The Measurement of the Atmospheric Phenomena Influence on the  
Optical Light Beam

Zásady pro vypracování:

Cílem této práce bude simulovat teplotní turbulence s ohledem na typ zvoleného zdroje záření pracujícího na různých vlnových délkách. Během práce se student zaměří i na měření polarizačních stavů optického svazku vlivem působení turbulence jevů.

1. Popis atmosférických optických komunikací.
2. Popis atmosférických jevů.
3. Měření a simulace atmosférických jevů na optický svazek.
4. Zhodnocení naměřených a vypočtených hodnot z měření.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] SALEH, B. E. A. *Základy fotoniky*. Praha: Matfyzpress, 1995. ISBN 80-85863-00-6
- [2] WILFERT, O., KOLKA, Z. *Statistical model of free-space optical data link*. In: Proc. of The International Symposium on Optical Science and Technology. Conference 5550. Denver: SPIE. 2004, p. 203-213.
- [3] WILFERT, O. *Optoelektronika*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2008.
- [4] ANDREWS, L., PHILLIPS, R., HOPEN, C. *Laser Beam Scintillation with Applications*. Washington: SPIE Press, 2001.
- [5] SHIRAI, T.; DOGARIU, A.; WOLF, E. *Directionality of some model beams propagating in atmospheric turbulence*. Optics Letters, 2003, Vol. 28, No. 8, pp. 610-612. ISSN 0146-9592.
- [6] HENNIGER, H.; WILFERT, O. *An Introduction to Free-space Optical Communications*. Radioengineering. 2011, Vol. 19, No. 2, pp. 203-212. ISSN 1210-2512.
- [7] ANDREWS, L., C.; PHILLIPS, R., L.; HOPEN, C., Y.; ALHABASH, M., A. *Theory of optical scintillation*. Journal of the Optical Society of America A. 1999, Vol. 16, No. 6, p. 1417 – 1429. ISSN 0740-3232.
- [8] RICKLIN, J., C.; DAVIDSON, F., M. *Atmospheric turbulence effects on a partially coherent Gaussian beam: Implications for free-space laser communication*. Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision, 2002, Vol. 19, No 9, pp. 1794-1802. ISSN 1084-7529.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

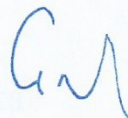
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Látal**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry

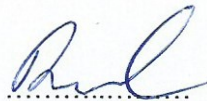


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 7.5.2015

  
.....  
podpis studenta

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval svému vedoucímu Ing. Janu Látalovi za ochotu, vstřícnost, odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Lukáši Hájkovi, Ing. Aleši Vanderkovi a Bc. Tomáši Sochovi za poskytnutí cenných rad.

V neposlední řadě mé díky patří také paní Ing. Martině Litschmannové Ph.D. za vstřícnost a odbornou pomoc při vytváření statistiky v této bakalářské práci. Poslední poděkování patří panu Ing. Petru Bučkovi za jazykovou korekturu a rovněž cenné rady při konstrukci této práce.

## **Abstrakt**

Cílem této práce je simulovat různé teplotní turbulence s možným ohledem na tři typy zvolených zdrojů záření, pracujících na různých vlnových délkách. Práce se dále zaměřuje na měření polarizačních stavů optického svazku vlivem působení mechanických a termických turbulentních jevů. Tato problematika byla řešená pomocí speciální simulační komory, ve které byla prováděná potřebná měření. Data byla následně statisticky zpracována a zhodnocena. Provedeným výzkumem bylo zjištěno, jaký mají různé druhy turbulencí vliv na optický svazek. Hlavním výsledkem je zpracování dat ve formě přehledné explorační analýzy a grafického výstupu. V závěru této práce byly výsledky zhodnoceny a popsány.

## **Klíčová slova**

optický svazek; Gaussův svazek; komplexní amplituda; turbulence; polarizace; atmosféra; simulační komora; polarizační stav; polarizační stupeň; Poincaréova koule; laser; fluktuace

## **Abstract**

Main goal of this thesis is to simulate different thermal turbulences regarding the three types of the chosen radiation source using various wave lengths. Thesis also deals with measurement of polarisation state of optical light beam influenced by mechanical and thermal turbulences. This matter was solved by performing required measurements in the special simulation chamber. Data was statistically processed and evaluated. Performed study showed influence of different turbulences on the optical light beam. Primary result is data processed in transparent form of exploration analysis and graphic output. Final results were assessed and described in the last part of this thesis.

## **Key words**

optical light beam; Gaussian beam; complex amplitude; turbulences; polarisation; atmosphere; simulation chamber; polarisation state; degree of polarization; poincaré sphere; laser; fluctuation

## Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
$\Delta_z$	[m]	Tloušťka vrstvy
$I_1$	[W/m <sup>2</sup> ]	Optická intenzita na začátku vrstvy
$I_2$	[W/m <sup>2</sup> ]	Optická intenzita na konci vrstvy
$L_{APP}$	[m]	Délka svazku v APP
$N_0$	[m <sup>-3</sup> ]	Stacionární hustota rozdílu obsazení hladin v nepřítomnosti zesilovaného zařízení
$T_\lambda(\lambda)$	[%]	Spektrální propustnost
$W_0$	[m]	Poloměr maximálního zúžení gaussova svazku
$t_{sp}$	[s]	Střední doba spontální emise
$z_0$	[m]	Rayleighova vzdálenost
$\nabla_T^2$	-	Příčný Laplaceův operátor
$\alpha_{1,app}$	[dB/km]	Koeficient útlumu
$\gamma_0$	[m <sup>-1</sup> ]	Koeficient zesílení
$\theta_0$	-	Úhel divergence
$c$	[m/s]	Rychlost světla
$I$	[A]	Proud
$k$	[m <sup>-1</sup> ]	Vlnové číslo
$P$	[W]	Optický výkon
$R(z)$	[m]	Poloměr křivosti gaussovského svazku
$S$	-	Stokesův vektor
$t$	[s]	Čas
$U$	[V]	Napětí



$\nu$	[Hz]	Frekvence
$W(z)$	[m]	Poloměr gaussovského svazku v osové vzdálenosti $z$ od středu svazku
$y$	[m]	Polohová souřadnice
$z$	[m]	Polohová souřadnice
$\epsilon$	-	Vektor intenzity el. pole
$A$	-	Komplexní obálka rovinné vlny
$A(r)$	-	Komplexní obálka vlny
$I$	[W/m <sup>2</sup> ]	Optická intenzita
$U(r, t)$	-	Komplexní vlnová funkce
$U(r)$	-	Komplexní amplituda
$dI(\lambda)$	[W/m <sup>2</sup> ]	Zeslabená optická intenzita
$dz$	[m]	tloušťka
$g(\nu)$	[Hz <sup>-1</sup> ]	Funkce spektrální závislosti přechodu
$n$	-	Index lomu prostředí
$q(z)$	[m]	Komplexní parametr gaussovského svazku
$r$	[m]	Radiální vzdálenost
$v$	[m/s]	Grupová rychlost vlnění
$\lambda$	[m]	Vlnová délka
$\alpha$	[km <sup>-1</sup> , km, nm]	Koeficient extinkce
$\alpha(\lambda)$	[m <sup>-1</sup> ]	Koeficient zeslabení
$\xi$		Vazební konstanta
$\rho$	[m <sup>-1</sup> ]	Optická stáčívost opticky aktivního prostředí
$\sigma(\nu)$	[m <sup>2</sup> ]	Účinný průřez přechodu
$\partial$	-	Parciální derivace

## Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
<b>APP</b>	atmosférické přenosové prostředí
<b>DOP</b>	polarizační stupeň (polarisation state)
<b>FSO</b>	free-space optics
<b>LASER</b>	zesilování světla stimulovanou emisí záření (light amplification by stimulated emission of radiation)
<b>OBS</b>	optický bezkabelový spoj

# Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Popis atmosférických optických komunikací.....	- 3 -
1.1 FSO - (Free - Space Optics) .....	- 3 -
1.2 Optický svazek .....	- 3 -
1.3 Gaussův svazek .....	- 4 -
1.4 Komplexní amplituda gaussovského svazku.....	- 5 -
1.5 Vlastnosti Gaussova svazku .....	- 7 -
1.5.1 Intenzita .....	- 7 -
1.5.2 Výkon svazku .....	- 8 -
1.5.3 Poloměr svazku .....	- 8 -
1.5.4 Divergence svazku .....	- 9 -
1.5.5 Ohnisková hloubka.....	- 9 -
1.5.6 Vlnoplochy .....	- 10 -
1.6 Vliv šumu a útlumu na optický svazek .....	- 11 -
1.7 Teorie laserů a vlastnosti laserů .....	- 13 -
1.7.1 Vlastnosti výstupního záření laseru.....	- 15 -
2 Popis atmosférických jevů .....	- 16 -
2.1 Teoretický popis atmosférických jevů a turbulencí.....	- 16 -
2.1.1 Atmosférická faktografie.....	- 16 -
2.1.2 Atmosférické jevy .....	- 18 -
2.1.3 Aerosoly .....	- 18 -
2.1.4 Rozptyl .....	- 18 -
2.1.5 Atmosférické přenosové prostředí.....	- 19 -
2.1.6 Turbulence.....	- 21 -
2.1.7 Rozdělení turbulencí.....	- 22 -
2.2 Polarizace .....	- 24 -
2.2.1 Polarizační vlastnosti.....	- 25 -
3 Měření a simulace atmosférických jevů na optický svazek .....	- 28 -
3.1 Simulační komora .....	- 28 -

3.2	Měření polarizace polarimetrem .....	- 30 -
3.2.1	Úvod do měření .....	- 31 -
3.2.2	Použité přístroje a pomůcky .....	- 31 -
3.2.3	Popis měření .....	- 32 -
3.2.4	Základní pojmy explorační analýzy .....	- 33 -
3.2.5	Explorační analýza pro měření polarizace .....	- 34 -
3.3	Měření tvaru svazku pomocí kamery .....	- 40 -
3.3.1	Úvod do měření .....	- 40 -
3.3.2	Použité přístroje a pomůcky .....	- 40 -
3.3.3	Popis měření .....	- 40 -
3.3.4	Příklady výsledků měření a statistiky .....	- 41 -
4	Zhodnocení naměřených a vypočtených hodnot z měření .....	- 49 -
4.1	Zhodnocení naměřených výsledků při měření polarizace. ....	- 49 -
4.2	Zhodnocení naměřených výsledků při měření termo-kamerou. ....	- 50 -
	Závěr .....	- 51 -
	Použité zdroje .....	- 53 -
	Seznam příloh .....	- 55 -

## Úvod

Bakalářská práce se skládá ze čtyř samostatných kapitol. První dvě kapitoly se zabývají teoretickými poznatky a je zde řešená základní problematika potřebná pro samotné měření v kapitole třetí. Kapitoly jsou totožné se zadáním bakalářské práce.

Kapitola první nese název popis atmosférických optických komunikací. Jako první je popsán bezvláknový optický spoj, jeho princip, výhody a nevýhody. Následně je vysvětleno, co si můžeme představit pod pojmem optický svazek. Rovněž jsou zde vysvětleny druhy optických svazků, a to primárně svazek Gaussov, ale zmíněný je také svazek Top-Hat. Je zde podrobně probrána Komplexní amplituda Gaussovského svazku, včetně příslušných matematických rovnic. Následně byly v kapitole popsány vlastnosti samotného Gaussova svazku: intenzita, výkon, poloměr, divergence a ohnisková hloubka. Také zde lze nalézt základní poznatky o teorii vlnoploch a vlnoploch Gaussova svazku. Lehce jsou probrány vlivy šumů a útlumů na optický svazek. V poslední části kapitoly se probírá teorie laserů, jelikož lasery nám simulují samotný optický svazek při měření.

Kapitola druhá nese název popis atmosférických jevů. Je zde popsána základní faktografie atmosféry a také atmosférické jevy. Velká část kapitoly je věnována atmosférickému přenosovému prostředí a z velké části je většina vztahů odvozena matematicky pomocí rovnic. Jsou zde probrány i základní poznatky o aerosolech a rozptylech. Jelikož v měření byly simulovány různé druhy turbulencí, jsou v této kapitole turbulence podrobně probrány. Matematicky je zde vyjádřeno i Reynoldsovo číslo, pomocí kterého se určuje druh turbulence. Předmětem podkapitoly je rovněž rozdělení turbulencí na mechanické a termické. Tímto rozdělením vyjadřujeme turbulence i v samotném měření. Nejdůležitější část této kapitoly je o polarizaci. Teorie o polarizaci a vlastností polarizace je stěžejní pro třetí kapitolu, kde je pro velkou část měření nutné znát tyto teoretické poznatky. Zde lze nalézt například podrobně rozepsané a matematicky vyjádřené pojmy, např. Stokesovy vektory a Poincaréova koule. Ta je využívána v kapitole 3.2.

V třetí kapitole je probrána praktická část této bakalářské práce. Nese název měření a simulace atmosférických jevů na optický svazek. Pro samotné měření byla využita speciální simulační komora a pomocí měřicích přístrojů byly data měřeny, ukládány a ve výsledku zpracovány jak graficky, tak statisticky. Pro následné zpracování dat byla použita celková explorační analýza. Jsou zde podrobně popsány měřicí přístroje a postup měření společně s jeho významem. Dále jsou také objasněny základní pojmy statistiky včetně vysvětlení přiložených grafů, které jsou pro měření obsahově velmi významné. V úvodu měření byla probrána reálná simulace atmosférických jevů a jejich tvorba v rámci simulace. V první části měření bylo provedeno měření polarizace pomocí polarimetru a díky následné statistice bylo možné určit turbulentní vlivy na svazek. Měření druhé, které se nachází v další části této kapitoly, se zabývá samotným tvarem optického svazku. Ten byl měřen pomocí speciálně upravené kamery s křemíkovým čipem. Výsledkem tohoto měření byly grafické výstupy, které se převedly do formátu přenosného dokumentu PDF (portable document format) a následně z nich byla

zpracována explorační analýza. Pomocí této analýzy byly vyhodnoceny jednotlivé simulované atmosférické vlivy.

Kapitola čtvrtá nese název zhodnocení naměřených a vypočtených hodnot z měření. Veškeré výsledky jsou zde okomentovány v souladu s výsledky explorační analýzy. Kapitola obsahuje závěrné ohodnocení měření.

V samotném závěru je k nalezení celkové ohodnocení všech provedených měření a přínos z nich získaných výsledků.

Přílohy této bakalářské práce se skládají z části A, B, C a CD přílohy. Příloha A obsahuje fotografickou dokumentaci pro měřicí stanoviště a měřicí přístroje. Příloha B obsahuje explorační analýzu pro měření dle kapitoly 3.2. Příloha C obsahuje explorační analýzu pro měření dle kapitoly 3.3. CD příloha obsahuje veškerá naměřená data.

# 1 Popis atmosférických optických komunikací

## 1.1 FSO - (Free - Space Optics)

FSO komunikace se používá pro přenos viditelného nebo infračerveného světla, které následně lze přenášet v atmosféře. Stejným způsobem, jako ve vláknové optice, FSO využívá k přenosu dat laser, ovšem data nejsou posílána skleněným vláknem, ale šíří se vzduchem. Rozdíl je v přenosovém médiu. Stejný princip, na kterém funguje FSO lze najít například u dálkových ovladačů. Pro tuto technologii se nevyžaduje použití drahých optických vláken ani rezervace licenčního pásma jako u rádiových sítí.

Tato technologie pracuje na propojení bezdrátových optických jednotek, skládající se z vysílače a přijímače. Spoj je plně duplexní viz kapitola 2.1.5. Vysílač musí mít dostatečný výkon na to, aby dosáhl na určenou vzdálenost. Přijímač musí mít oproti tomu velkou citlivost. Nejčastěji se používá spoj bod-bod (point-to-point) ale lze použít i spojení bod s více body (point-to-multipoint). Přenosová rychlost se pohybuje okolo 100 Mbit/s až 2,5 Gbit/s. Pro budoucnost se plánují přenosové rychlosti mnohem vyšší. Princip FSO lze aplikovat na velké vzdálenosti, ale mezi vysílačem a přijímačem musí být přímá viditelnost. Signál lze velice těžce zachytit, a proto je tento systém považován za bezpečný.

Za výhody lze považovat odolnost vůči rádiovému frekvenčnímu pásmu, žádné bezpečnostní softwary, umístění za okny a malý rozptyl vyzařovaného paprsku. Díky malému rozptylu lze použít i více optických jednotek bez vzájemného rušení.

Za nevýhody lze stanovit velkou citlivost na prostředí, vysokou cenu, malý paprskový dosah, nebezpečí poškození zraku při nedbalém zacházení a vychýlení paprsku při chvění budov. [22] [23]

## 1.2 Optický svazek

Pokud je v dnešní době zájem přenášet data nebo informace, může se použít optický svazek, který je také častým řešením. Optický svazek lze šířit ve vláknech nebo ve volné atmosféře. U každého přenosového prostředí se dá určit, jaké má vlastnosti a podle toho je vliv na daný svazek poměrně různý.

Aby se zajistila co nejlepší kvalita informace, která se přenáší, dochází k tvarování samotného svazku.

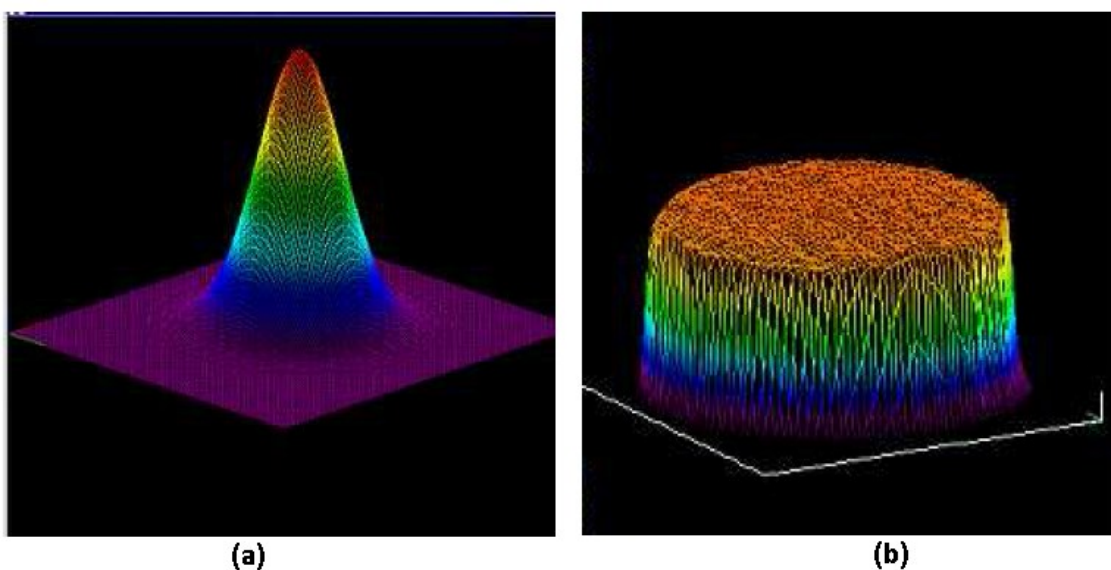
Vlny, jejichž normály vlnoploch svírají malý úhel s osou  $z$ , se nazývají paraxiálními vlnami. Je důležité, aby splňovaly paraxiální Helmholtzovou rovnici, která je vyjádřena v kapitole 1.4. Důležitým řešením této rovnice, která má vlastnosti optického svazku, je vlna, nazývaná Gaussovský svazek. Její výkon je soustředěn uvnitř úzkého kužele.

Rozeznáváme několik druhů tvaru optických svazků. Jsou to například již zmíněný svazek Gaussova profilu nebo například svazek Top-Hat.

Každý tvar má své výhody a nevýhody, a proto je důležité, v jakých podmínkách ho použijeme. Jelikož profil svazku Top-Hat je více tupý než profil Gaussova svazku, dochází při příjmu signálu k menší fluktuaci optického signálu na straně přijímače. Nevýhodou je, že svazek je širší a proto je rozložení hustoty optického výkonu větší, než v případě Gaussova profilu. [2] [5]

### 1.3 Gaussuv svazek

Při stanovení pracovních podmínek laseru hraje roli fokusovaný průměr svazku, jeho divergence a také hloubka ostrosti. V základním módu má energie daného svazku tvar Gaussovy křivky s jedním maximem uprostřed svazku. Svazek, vystupující ze zdroje je rovnoběžný s optickou osou. (Jeho rovinná plocha je kolmá na směr šíření) Svazek má nejmenší divergenci a zároveň tvoří stopu o velmi malém průměru a vysoké hustotě výkonu. Nerovnoměrnosti v rozměrech aktivní vrstvy způsobují především odchylky reálného od ideálního Gaussova průběhu. Kruhově symetrická Gaussova funkce popisuje rozložení intenzity v jakékoli příčné rovině, a zároveň osa symetrie je totožná s optickou osou. Krček Gaussova svazku je bod, ve kterém je šířka minimální (v tomto místě má vlna rovinnou vlnoplochu) a směrem od krčku se postupně zvětšuje na obě strany (vlnoplochy se postupně zakřívují, ve velké vzdálenosti téměř dosahují, tvaru koule viz kapitola 1.5.6.). [2] [5]



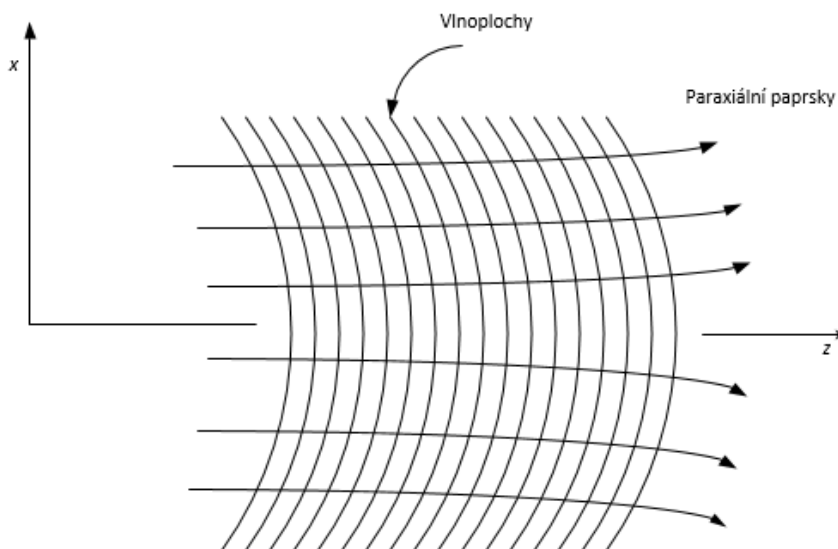
Obrázek 1.1: *Příklad ideálního svazku Gaussova (a) a Top-Hat (b). [7]*



## 1.4 Komplexní amplituda gaussovského svazku

Paraxiální vlna je rovinná vlna  $\exp(-jkz)$  s vlnovým číslem  $k = 2\pi / \lambda$  a vlnovou délkou  $\lambda$ , která je modulována komplexní obálkou  $A(r)$ , která je pomalu proměnnou funkcí polohy, viz obr. 1.2. Pro komplexní amplitudu platí:

$$U(r) = A(r)\exp(-jkz) \quad (1.1)$$



Obrázek 1.2: Vlnoplochy a normály k vlnoplochám paraxiální vlny. [2]

O obálce můžeme předpokládat, že je při změně vzdáleností o  $\lambda$  přibližně konstantní, tudíž se jedná o lokálně rovinnou vlnu. Můžeme tedy pozorovat, že normály k vlnoploše tvoří paraxiální paprsky. Aby ovšem byla pro komplexní amplitudu  $U(r)$  splněna Helmholtzova rovnice  $\nabla^2 U + k^2 U = 0$ , musí být komplexní obálka  $A(r)$  řešením Helmholtzovy rovnice:

$$\nabla_T^2 A - j2k \frac{\partial A}{\partial z} = 0 \quad (1.2)$$

Kde  $\nabla_T^2 = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2$  je tranverzální Laplaceův operátor [2].

Jednoduchému řešení paraxiální Helmholtzova rovnice paraboloidní vlna:

$$A(r) = \frac{A_1}{z} \exp\left(-jk \frac{\rho^2}{2z}\right), \quad \rho^2 = x^2 + y^2 \quad (1.3)$$

Kde  $A_1$  je konstanta, přitom pro  $x$  a  $y$  mnohem menší než  $z$  je paraboloidní vlna paraxiální aproximací sférické vlny  $U(r) = (A_1/r) \exp(-jkr)$ .

Gaussovský svazek je řešením paraxiální Helmholtzovy rovnice. Pokud použijeme jednoduchou aproximaci, získáme ho z paraboloidní vlny. Vzhledem k tomu, že komplexní obálka

paraboloidní vlny podle 1.3 je řešením Helmholtzovy rovnice 1.2 je jejím řešením obálka posunutá o hodnotu  $\xi$  a  $z$  nahradíme výrazem  $z - \xi$ .

Symbol  $\xi$  označuje konstantu. Jedná se o paraboloidní vlnu v bodě  $z = \xi$  namísto  $z = 0$ . Pokud bude konstanta  $\xi$  komplexní, jedná se stále o řešení z rovnice 1.2, ale získá vlastnosti, které se ubírají výrazně jiným směrem. Pokud je  $\xi$  ryze imaginární můžeme definovat komplexní obálku Gaussovského svazku:

$$A(r) = \frac{A_1}{q(z)} \exp \left[ -jk \frac{\rho^2}{2q(z)} \right], q(z) = z + jz_0 \quad (1.4)$$

Parametr  $z_0$  je znám jako Rayleighova vzdálenost [2].

Protože je nutné oddělit amplitudu a fázi této komplexní obálky, zapíšeme komplexní funkci  $1/q(z) = 1 / (z + jz_0)$  pomocí její reálné a imaginární části. Také si nadefinujeme dvě nové funkce  $R(z)$  a  $W(z)$

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - j \frac{\lambda}{\pi W^2(z)} \quad (1.5)$$

$R(z)$  a  $W(z)$  popisují pološířku svazku a poloměr křivosti jeho vlnoplochy.

Výraz pro komplexní amplitudu  $U(r)$  Gaussovského svazku lze získat dosazením z rovnice 1.5 do vztahu 1.4 a také pokud použijeme rovnici 1.1:

$$U(r) = A_0 \frac{W_0}{W(z)} \exp \left[ -\frac{\rho^2}{W^2(z)} \right] \times \exp \left[ -jkz - jk \frac{\rho^2}{2R(z)} \right] + j\xi(z) \quad (1.6)$$

Parametry svazku potom vypadají takto:

$$W(z) = W_0 \left[ 1 + \left( \frac{z}{z_0} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1.7)$$

$$R(z) = z \left[ 1 + \left( \frac{z}{z_0} \right)^2 \right] \quad (1.8)$$

$$\xi(z) = \arctan \frac{z}{z_0} \quad (1.9)$$

$$W_0 = \left( \frac{\lambda z_0}{\pi} \right) \quad (1.10)$$

Bylo velice výhodné nadefinovat novou konstantu  $A_0 = A_1 / jz_0$ . Výraz komplexní amplituda Gaussovského svazku obsahuje dva parametry a to  $A_0$  a  $z_0$ , které jsou určeny okrajovými podmínkami. Všechny ostatní parametry souvisí s Rayleighovou vzdáleností  $z_0$  a s vlnovou délkou  $\lambda$ . Jsou to vztahy dle 1.7 až 1.10.

Všechny výpočty v této kapitole ověřeny podle [2].

## 1.5 Vlastnosti Gaussova svazku

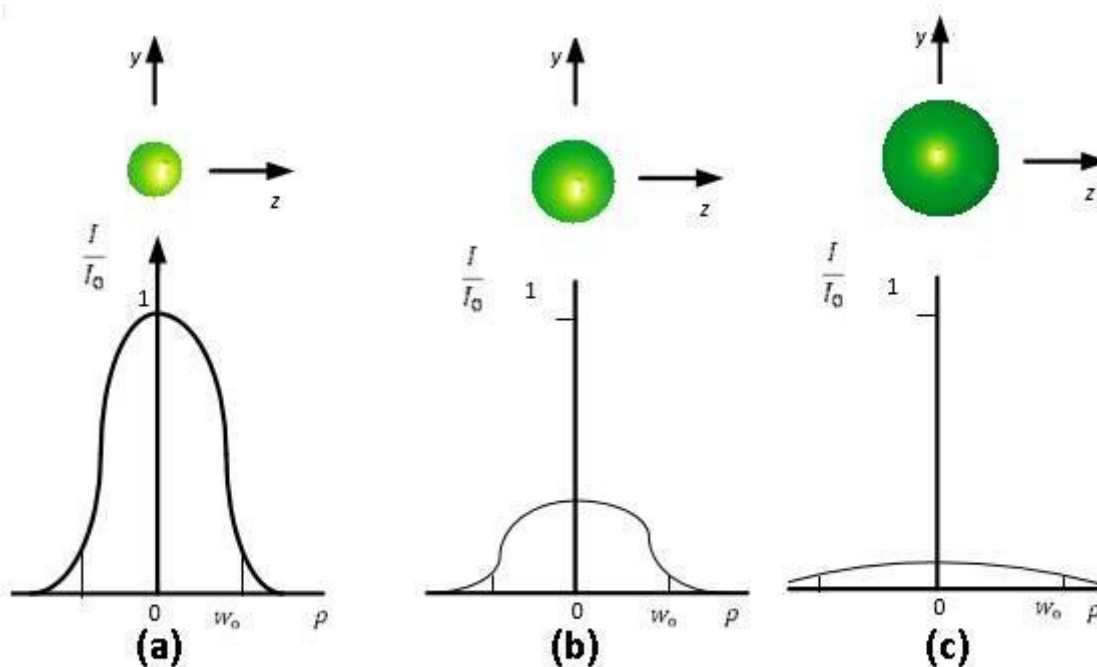
Z rovnic v předešlé kapitole 1.4 můžeme nyní definovat vlastnosti Gaussovského svazku. [2]

### 1.5.1 Intenzita

Intenzita optického záření  $I(r) = |U(r)|^2$  je funkcí axiální vzdálenosti  $z$  a radiální vzdálenosti  $\rho = (x^2 + y^2)^{1/2}$ ,

$$I(\rho, z) = I_0 \left[ \frac{w_0}{w(z)} \right]^2 \exp \left[ -\frac{2\rho^2}{w^2(z)} \right] \quad (1.11)$$

Kde  $I_0 = |A_0|^2$ . Pro každou hodnotu  $z$  je intenzita gaussovskou funkcí radiální vzdálenosti  $\rho$ . Proto se vlna nazývá gaussovským svazkem. Gaussova funkce dosahuje největší hodnoty pro  $\rho = 0$  na ose  $z$  a monotónně klesá se vzrůstajícím  $\rho$ . Pološířka gaussovského rozložení  $W(z)$  vzrůstá s axiální vzdáleností  $z$ . Můžeme to pozorovat na obrázku níže:



Obrázek 1.3: Normovaná intenzita svazku  $I/I_0$  jako funkce radiální vzdálenosti  $\rho$  pro různé axiální vzdálenosti  $z$ : (a)  $z = 0$ , (b)  $z = z_0$  a (c)  $z = 2z_0$ . [2]

Na ose svazku ( $\rho = 0$ ) má intenzita

$$I(0, z) = I_0 \left[ \frac{W_0}{W(z)} \right]^2 = \frac{I_0}{1 + \left( \frac{z}{z_0} \right)^2} \quad (1.12)$$

### 1.5.2 Výkon svazku

Celkový výkon optického svazku je dán integrálem ze součinu intenzity záření a plochy příčného průřezu svazku (např. ve vzdálenosti  $z$ )

$$P = \int_0^\infty I(\rho, z) 2\pi\rho d\rho \quad (1.13)$$

Z tohoto lze odvodit:

$$P = \frac{1}{2} I_0 (\pi W_0^2) \quad (1.14)$$

Podle očekávání výsledek nezávisí na  $z$ . Výkon svazku je dán poloviční hodnotou součinu maximální intenzity s plochou kruhu o poloměru, který se rovná středové pološírce svazku. Vzhledem k tomu, že Gaussovske svazky jsou často charakterizovány přenášeným výkonem  $P$ , je užitečné prostřednictvím rovnice 1.14 vyjádřit  $I_0$  jako funkci  $P$  a vztah 1.11 lze přepsat do následujícího tvaru:

$$I(\rho, z) = \frac{2P}{\pi W^2(z)} \exp \left[ -\frac{2\rho^2}{W^2(z)} \right] \quad (1.15)$$

Uvnitř kružnice je přenášeno přibližně 86% celkového výkonu. Kruhem o poloměru  $1,5 W(z)$  se šíří přibližně 99% výkonu. [2]

### 1.5.3 Poloměr svazku

V každém příčném průřezu svazku dosahuje intenzita největší hodnoty na ose  $z$  a v radiální vzdálenosti  $\rho = W(z)$  poté poklesne na  $\frac{1}{e^2} \approx 0,135$  její největší možné hodnoty. Tento výrok je dán tím, že 86% výkonu se šíří oblastí o poloměru  $W(z)$ , bereme  $W(z)$  jako náš poloměr svazku (někdy nazývaný jako pološířka nebo šířka svazku).

Závislost poloměru svazku na  $z$  je dán vztahem:

$$W(z) = W_0 \left[ 1 + \left( \frac{z}{z_0} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1.16)$$

V rovině  $z = 0$  nabývá minimální hodnoty  $W_0$ . Toto místo se nazývá místem maximálního zúžení-středem svazku a  $W_0$  je tedy tady brán jako poloměr. Průměr  $2W_0$  je označován jako

velikost stopy. Poloměr svazku s rostoucím  $z$  postupně vzrůstá, pro  $z = z_0$  dosahuje  $\sqrt{2}W_0$  a dále pak pro zvětšující se  $z$  monotónně roste. [2]

#### 1.5.4 Divergence svazku

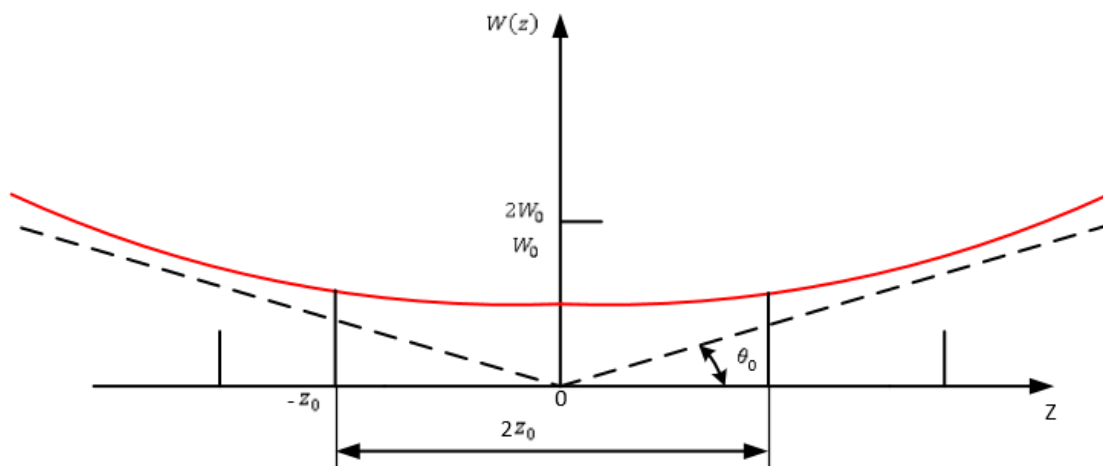
Pokud jsme daleko od středu svazku, vzrůstá jeho poloměr přibližně lineárně s rostoucím  $z$  a vytváří kužel s vrcholovým úhlem  $2\theta$ . Tímto kuželem se šíří asi 86% celkového výkonu svazku. Divergence v tomto svazku je tedy dána následujícím úhlem:

$$\theta_0 = \frac{2}{\pi} \frac{\lambda}{2W_0} \quad (1.17)$$

A středového průměru svazku  $2W_0$ . Menší středový poloměr vyžaduje větší divergenci. Chceme-li získat dobře kolimovaný svazek, musíme pracovat s kratší vlnovou délkou a větším středovým poloměrem. [2]

#### 1.5.5 Ohnisková hloubka

Podle obrázku 1.3 můžeme vidět, že svazek máme nejužší v  $z = 0$ . V této rovině má svazek nejlepší ohnisko. Poté se na obě strany postupně rozšiřuje.



Obrázek 1.4: Ohnisková hloubka Gaussovského svazku. [2]

Ohnisková hloubka je přímo úměrná ploše průřezů svazku v místě maximálního zúžení a také je nepřímo úměrná vlnové délce. Pokud svazek fokusujeme do menší stopy, získáme kratší ohniskovou hloubku. Bohužel toto má mnohem větší požadavky na přesnost nastavení

ohniskové roviny. Pro větší vlnové délky můžeme zároveň dosáhnout malé stopy a velké ohniskové hloubky. [2]

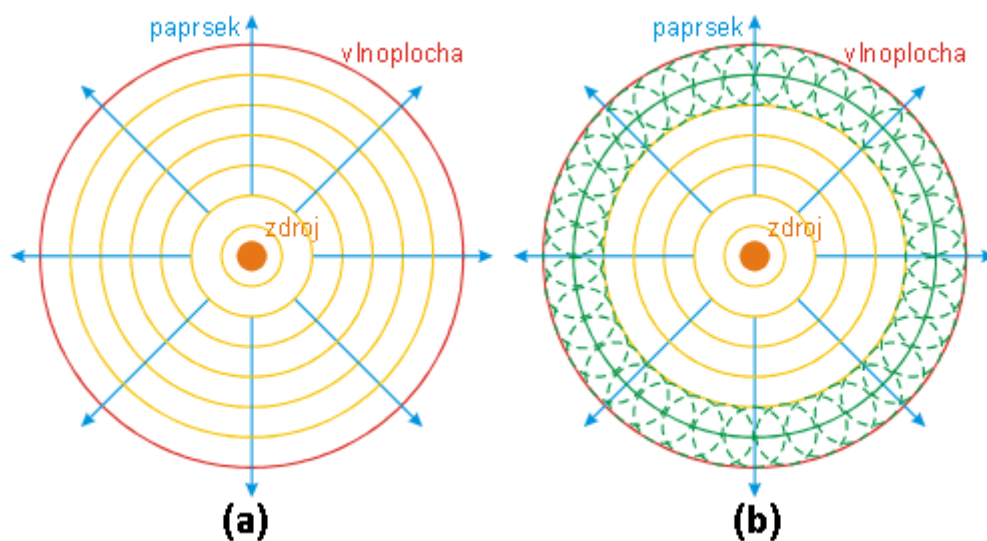
### 1.5.6 Vlnoplochy

Vlnoplocha je plocha, na které kmitají body se stejnou fází. Paprsek zobrazuje směr šíření, kolmice k vlnoploše v daném bodě.

Ve větší vzdálenosti od zdroje je poloměr vlnoplochy tak obrovský, že v oblasti zkoumaného bodu ji můžeme považovat za vlnu rovinnou.

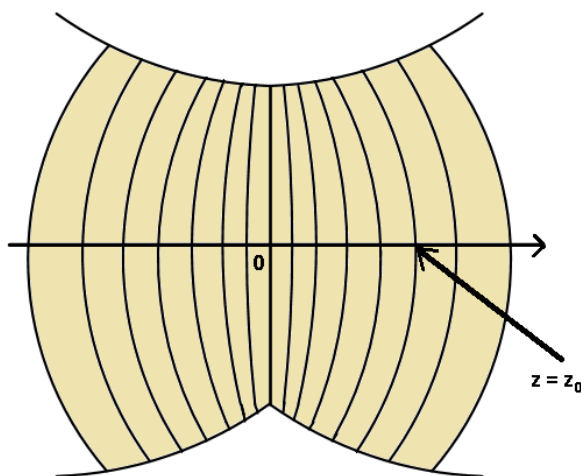
Tuto teorii lze podložit Huygensovým principem: Každý bod vlnoplochy, do něhož dospělo vlnění v určitém okamžiku, můžeme pokládat za zdroj elementárního vlnění, které se z něj šíří v elementárních vlnoplochách. Vlnoplocha v delším časovém okamžiku je vnější obalová plocha všech elementárních vlnoploch.

Vlnění, které vybudí zdroj, můžeme nahradit vlněním vybuzeným body, ke kterým se vlnění dostalo jen v některém z předešlých okamžiků. [6]



Obrázek 1.5: Rozdíl mezi klasickým přístupem vlnoploch (a) a s využitím Huygensova principu (b). [6]

Divergující (rozbíhavá) vlnoplocha má kladný a konvergující (sbíhavá) záporný poloměr křivosti. Na obrázku níže můžeme vidět vlnoplochy samotného Gaussova svazku. [2]

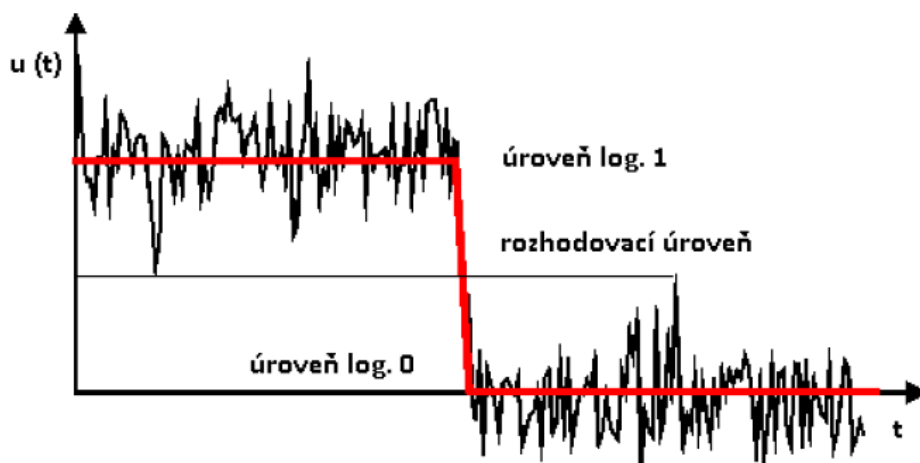


Obrázek 1.6: Vlnoplochy Gaussovského svazku [2]

## 1.6 Vliv šumu a útlumu na optický svazek

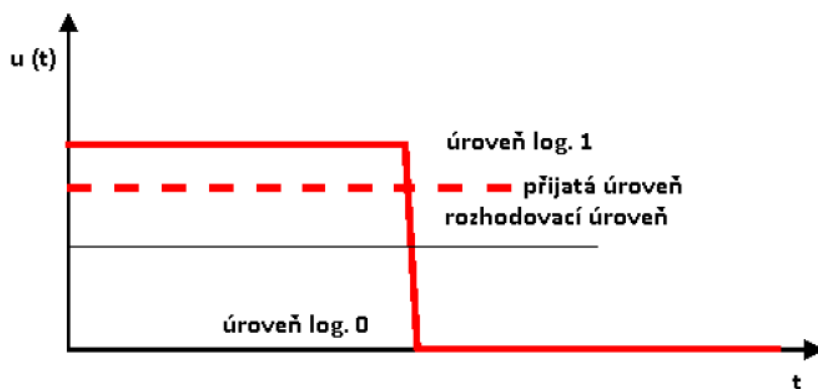
Šum, a útlum mají velký vliv na přenášený signál. Projevují se na vstupu přijímače v důsledku fluktuací přijatého optického výkonu. Při šíření optického svazku atmosférickým přenosovým prostředím dochází k oběma jevům současně, takže se jejich vliv na přijímací straně sčítá. Další působení může být například turbulence a ostatní vlivy.

Pro šumy je charakteristické, že se při přenosu signálu na signál přichytí a tím se v přijímači nezíská stejný signál, který byl vyslán jako první. Pokud není šum moc výrazný lze signál bez větších problémů rozlišit. Když však je jeho úroveň velká a mohlo by dojít k špatnému vyhodnocení signálu, lze použít pro odstranění šumu speciální filtry. Například pokud by digitální signál nabýval logické „1“ a logické „0“ a rozhodovací úroveň by byla uprostřed, mohla by nastat situace, kdy šum přesáhne tuto rozhodovací úroveň a dojde k špatnému vyhodnocení. [5]



Obrázek 1.7: Vliv útlumu na signál [5]

V případě útlumu je přijata úroveň signálu menší, než byla při jeho vyslání. Tím může opět zopakovat situace špatného vyhodnocení logických úrovní signálu.



Obrázek 1.8: Vliv šumu na útlum [5]



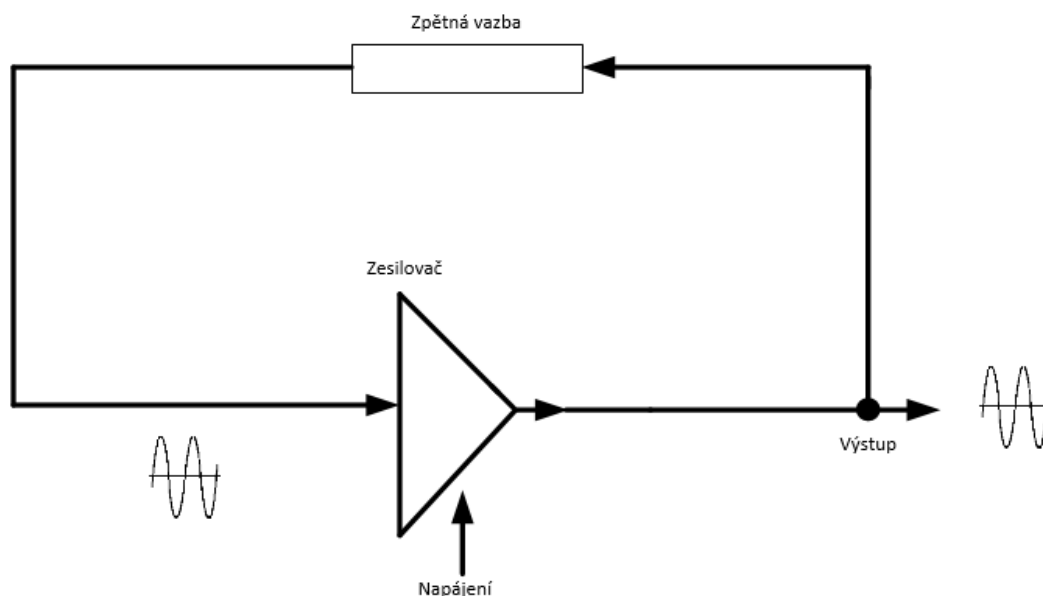
## 1.7 Teorie laserů a vlastnosti laserů

Vzhledem k používání zesilování světla stimulovanou emisí záření laser (light amplification by stimulated emission of radiation) zdrojů při měření v třetí kapitole této práce jsou zde popsány základní poznatky o laserech.

Laser je optický oscilátor, který se skládá z rezonančního optického zesilovače, jehož výstupní signál se vrací zpětnou vazbou sfázovaný znovu do vstupu viz obr. 1.9. Pokud na vstupu nemáme žádný vstupní signál, tak nebudeme mít ani žádný signál výstupní, tudíž i signál zpětné vazby je potom nulový. Takový stav musíme označit za nestabilní. Sebenepatrnější šum, který bohužel vždy existuje, může na vstupu iniciovat proces, který nazýváme oscilace. Tento proces se stále opakuje, až vznikne signál na výstupu, který je většího rozsahu.

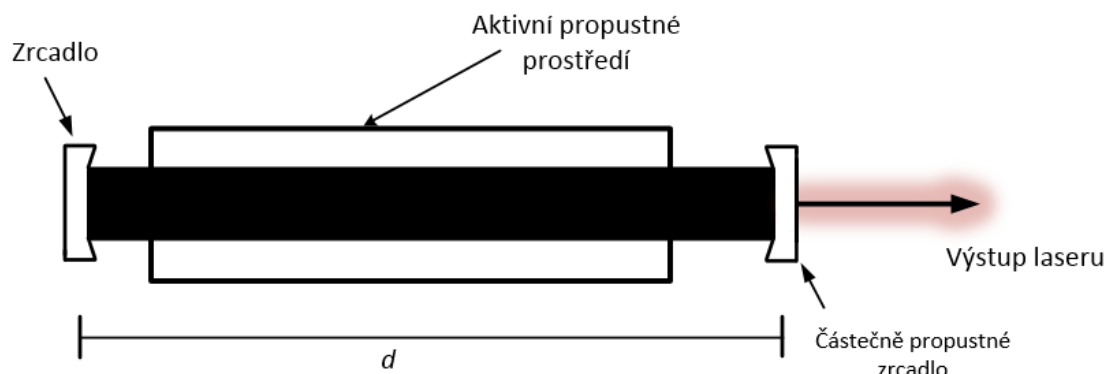
Aby nastaly oscilace, musí být splněny dvě podmínky:

- Zisk zesilovače musí být větší než ztráty systému zpětné vazby, takže při jednom oběhu smyčkou se zpětnou vazbou se získává čistý zisk.
- Celková změna fáze při jednom oběhu musí být celočíselným násobkem  $2\pi$ , potom signál zpětné vazby je sfázovaný s původním signálem, který je na vstupu.



Obrázek 1.9: Oscilátor je zesilovačem s kladnou zpětnou vazbou. [4]

Laser můžeme považovat za optický oscilátor, jehož zesilovačem je čerpané aktivní prostředí. Saturace zisku je základní vlastností laserových zesilovačů. Lasery se široce využívají v nejrůznějších vědeckých aplikacích, IT, geologii metrologii, hojně při měření vzdálenosti atd.



Obrázek 1.10: Laser - skládá se z optického zesilovače, který je uvnitř optického rezonátoru.[4]

Laserové zesílení se dosahuje stimulovanou emisí v atomárních nebo molekulárních emisích. Laserový zesilovač je úzkopásmový koherentní zesilovač světla. Pásmo zesilovače je dáno šířkou čáry atomového přechodu nebo mechanismem nehomogenního rozšíření. Tím může být například Dopplerův jev v plynových laserech.

Laserový zesilovač je zařízení, které má prostorově rozložený zisk. Tento zisk je charakterizován koeficientem zesílení.

$$\gamma_0(\nu) = N_0 \sigma(\nu) = N_0 \frac{\lambda^2}{8\pi t_{sp}} g(\nu) \quad (1.18)$$

Kde  $N_0$  značí rovnovážnou hustotu inverzního obsazení hladin (koncentrace atomů v horním energetickém stavu minus koncentrace atomů v dolním energetickém stavu).  $N_0$  vzrůstá s rostoucí rychlostí čerpání.  $\sigma(\nu)$  značí efektivní průřez přechodu,  $t_{sp}$  je doba spontánního přechodu,  $g(\nu)$  je funkce tvaru spektrální čáry,  $\lambda$  je vlnová délka v prostředí.

Optická zpětná vazba se dosahuje umístěním aktivního prostředí do optického rezonátoru. Šíření vlnění prostředím vede ke změně fáze, která se na jednotce délky rovná vlnovému číslu

Koeficient fázové změny potom vypadá takto:

$$k = \frac{2\pi\nu}{c} \quad (1.19)$$

Rezonátor také přispívá ke ztrátám celého systému. Absorpce a rozptyl způsobují v prostředí prostorově rozložené ztráty.

Aby laser oscilloval, musí být splněny dvě podmínky. Podmínka zesílení určuje minimální rozdíl obsazení hladin a tím prahovou hodnotu čerpání nutnou k činnosti laseru. Fázová podmínka určuje frekvenci, na níž laser osciluje. [4]

### 1.7.1 Vlastnosti výstupního záření laseru

Jednou z nejdůležitějších vlastností laserů je výkon. Ten popisujeme hustotou vnitřního fotonového toku, výstupní hodnotou fotonového toku, vnitřní hustotou fotonů a výstupním fotonovým tokem a účinností.

Dále nesmíme zanedbat spektrální složení. To je určeno jak tvarem čáry atomového přechodu aktivního prostředí, tak módy rezonátoru. V tomto případě mohou být prostředí pro rozšíření spektrální čáry dvě a to prostředí homogenní a nehomogenní.

Zajímavé jsou další vlastnosti a to prostorové rozložení světla a polarizace. Prostorové rozložení světla vyzařovaného laserem závisí na geometrickém uspořádání rezonátoru a na tvaru aktivního prostředí. Rezonátor je velice citlivý na geometrické nastavení. Důsledkem rozdílného prostorového rozložení se vykazují různé hodnoty pro zesílení a ztráty. Gaussovský mód je nejvíce soustředěný okolo optické osy a vykazuje tudíž nejmenší difrakční ztráty na okrajích zrcadel. V laserech s homogenním rozšířením má nejsilnější mód tendenci potlačovat zesílení všech ostatních módů. V našem případě potřebujeme, aby lasery pracovaly v jediném příčném módu, jelikož pracujeme s Gaussovým módem, ten má nejmenší průměr svazku a lze jej fokusovat na nejmenší plochu. Pro polarizaci platí, že každý mód má dva stupně volnosti odpovídající dvěma nezávislým ortogonálním polarizacím. Na tyto dvě polarizace pohlížíme jako na dva módy co jsou nezávislé. Jestliže vlastnosti rezonátoru a aktivního prostředí vedou ke stejným hodnotám zesílení a ztrát pro obě polarizace, bude laser oscilovat v obou modech zároveň, nezávisle a se stejnou intenzitou.

Poslední vlastnost je módová selekce. Mnoha módový laser může generovat záření v jednom modu, jestliže do rezonátoru vložíme element, který vnese dostatečně velké ztráty, aby nedošlo k nežádoucím oscilacím. [4]

## 2 Popis atmosférických jevů

### 2.1 Teoretický popis atmosférických jevů a turbulencí

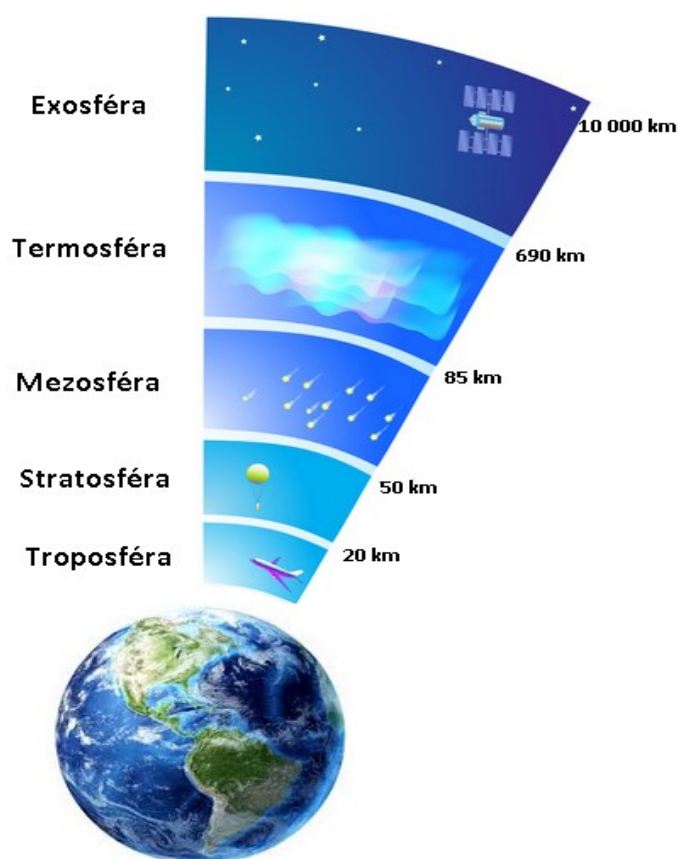
#### 2.1.1 Atmosférická faktografie

Atmosféru země můžeme definovat jako obálku, která obsahuje velkou řadu prvků a sloučenin, především však plynů, které obklopují naši planetu. V případě naší Země sahá atmosféra až do výšky několika tisíce kilometrů. Co se týče počtu částic, jsou mnohem více zajímavé vrstvy umístěny ve vzdálenosti několika stovek kilometrů od zemského povrchu.

Atmosféra se skládá z několika částí, viz obr. 1.8. Nejvyšší vrstvou atmosféry je exosféra, kde se nacházejí atomy vodíku a hélia, které mohou díky slabé gravitaci z exosféry uniknout. Pod exosférou se nachází termosféra, která se nachází ve vzdálenosti 80-55 km od povrchu Země. Termosféra obsahuje dvě vrstvy ionosféry E a F. Tyto vrstvy obsahují ionty kyslíku a dusíku. Ionosféra rovněž umožňuje odrazet rádiové vlny. Ve výšce 50 - 80 km se nachází mezosféra. Mezosféra je pro člověka velice obtížně dosažitelná, také má velice nízké teploty, které sahají až k  $-100^{\circ}\text{C}$ . Zahrnuje ovšem nejnižší D vrstvu ionosféry, obsahuje ionizované molekuly  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{NO}$ . Samotná ionizace probíhá především za osvětlení Sluncem. Při ionizaci může dojít k vyšším útlumům velmi krátkých rádiových vln, které se šíří přes den. Další vrstvou, která je pod mezosférou nese název stratosféra. Nachází se od výšky 11 km od povrchu Země. Tato vrstva je dobře zmapována díky letadlům a meteorologickým balónům. Ve vzdálenosti 25 - 35 km se nacházejí molekuly ozónu  $\text{O}_3$ , proto se tuto část nazýváme ozonovou vrstvou. Vrstva je velice důležitá, protože pohlcuje krátkovlnné záření jako je například UV světlo, které by jinak bylo pro nás a všechny živé organismy na Zemi nebezpečně vysoké. Ve stratosféře se rovněž nacházejí prachové částičky sopečného původu, nebo oxidy síry. Ty mají vliv na naše počasí a teplotu samotné Země, protože mohou blokovat a odrazet sluneční záření. Nejnižší vrstvou je troposféra, která sahá až k našemu povrchu. Je to nejvíce obsáhlá část naší atmosféry, jelikož se 80 - 90% hmotnosti atmosféry situuje právě v troposféře. Troposféra obsahuje vodu v podobě aerosolu, ledu apod. Dalšími významnými složkami jsou molekuly dusíku, kyslíku, oxidu uhličitého a jiných vzácných plynů (Argon, Xenon...). [8]

Tabulka 2.1: Zastoupení jednotlivých plynů v dnešní atmosféře. [7]

Plyn	Chemický vzorec	Zastoupení v [ % ]
Dusík	$N_2$	78,08
Kyslík	$O_2$	20,95
Argon	$Ar$	0,93
Oxid uhličitý	$CO_2$	0,038
Vodní pára a plyny	$H_2O$	0,01



Obrázek 2.1: Schéma atmosféry

### 2.1.2 Atmosférické jevy

Atmosférické jevy jsou přírodní úkazy, které jsou svým způsobem velice zajímavé, a v dnešní době je již dokážeme vědecky popsat. Synoptická meteorologie jej definuje: atmosférický jev neboli meteor je v obecném smyslu název pro jev pozorovaný v atmosféře nebo na zemském povrchu s výjimkou oblaků. Sledování atmosférických jevů se provádí na meteorologických stanicích.

Atmosférické jevy dělíme následovně:

- Hydrometeory, to je soustava vodních částic v kapalném nebo pevném skupenství. Mohou se vznášet volně v atmosféře, nebo můžou padat. Můžeme mezi ně zařadit mlhu, déšť, sníh, rosu, námrazu apod.
- Litometeory jsou vytvořené soustavou částic, které jsou pevného skupenství, nepocházejí ovšem z vody. Nalezneme zde zákaly, kouř, zvířený prach, písek, nebo víry.
- Fotometeory jsou světelné jevy v ovzduší vyvolané odrazem, lomem, rozptylem či interferencí slunečního, nebo měsíčního světla. Patří sem například zrcadlení, fata morgána, optické chvění, scintilace, zelený paprsek, duha, bílá duha, halové jevy, ohybové jevy, soumrakové jevy.
- Za Elektrometeory můžeme pokládat projevy atmosférické elektřiny, které jsou viditelné nebo lze je slyšet. Patří sem bouřky, blyskavice, hřmění, polární záře, Eliášův oheň, protonový oblouk. [9]

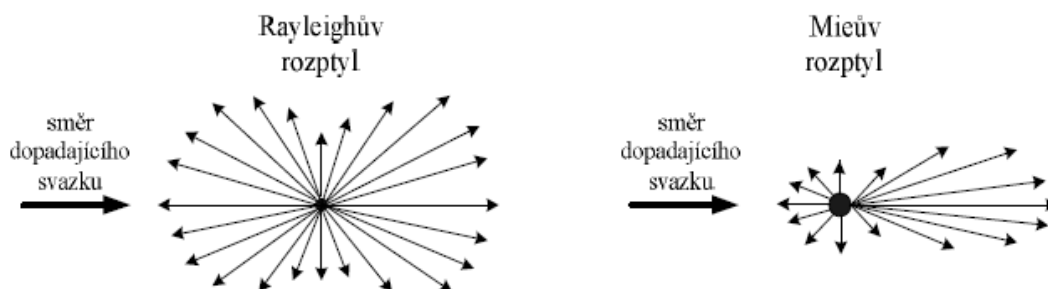
### 2.1.3 Aerosoly

Aerosol znamená rozptýlení pevných nebo kapalných částic v plynném médiu. Jejich velikost se zhruba orientuje v rozsahu 0,11  $\mu\text{m}$  až 10  $\mu\text{m}$  v poloměru. Pokud jsou kapky aerosolu větší, tím menší bude jejich koncentrace v naší atmosféře. Mezi aerosoly patří například oblaka, oparové kapky a mlhové kapky. V oblastech, které se situují kolem moře, je výskyt aerosolu mnohem větší. Pro názornou ukázkou je níže přiložena tabulka. Aerosoly můžou způsobit absorpci nebo rozptyl dopadajícího světla. [11]

### 2.1.4 Rozptyl

Rozptyl je vyvolán tím, že dopadají fotony záření na molekuly vzduchu a také na aerosoly. Rozptyl můžeme rozdělit na Mieov rozptyl a rozptyl Rayghelův. Mieuv rozptyl zahrnuje komplexní rozptyl i absorpci a to pro sférické i nesférické částice, včetně závislosti na velikosti částice. Rovněž můžeme u Mieova rozptylu definovat rozdělení na částice, které jsou a nejsou elektricky nabitě.

Rayghelův rozptyl je podmnožina Mieova rozptylu. Je aplikovatelný na malé částice v ohrnutí s vlnovou délkou a pouze pro částice se sférickým tvarem. [13]



Obrázek 2.2: Schéma Rayleighova a Mieova rozptylu. [13]

### 2.1.5 Atmosférické přenosové prostředí

Pro atmosférickou terminologii lze použít pojem optický bezkabelový spoj OBS. V terminologii anglické se často používá pojem free-space optics FSO. Tento spoj je plně duplexní a využívá optické nosné vlny k přenosu informací v atmosférickém přenosovém prostředí APP. Tyto nosné vlny využívají vlnově dělené kanály, jejichž optický výkon se soustředí do jednoho nebo více svazků. V nejjednodušším případě se tento spoj používá pro přenos signálu s digitální modulací. Tyto spoje můžeme provozovat jak v uzavřené místnosti, tak v ovzduší v troposféře a dokonce i v kosmickém prostoru.

APP má veliký vliv na kvalitní přenos. Jeho vliv na kvalitu parametrů přenosového kanálu má proměnlivý charakter.

Základní veličinou pro popsání vlivu APP prostředí je koeficient extinkce  $\alpha$  a index lomu prostředí  $n$ . Obě veličiny závisí na souřadnicích prostoru, na času a na délce optické vlny. Statický charakter koeficientu extinkce neboli zeslabení je dán variací  $\sigma_\alpha^2$  a dále taky hodnotou  $\overline{\alpha}$ . Statický charakter indexu lomu se určuje strukturním parametrem indexu lomu  $C_n^2$  a střední hodnotou  $\bar{n}$ .

$$\alpha = \alpha(\vec{r}, t, \lambda); \overline{\alpha}; \sigma_\alpha^2 \quad (2.1)$$

$$n = n(\vec{r}, t, \lambda); \bar{n}; C_n^2 \quad (2.2)$$

Definování extinkce v APP je dáno z Bouguerova zákona:

$$dI(\lambda) = -\alpha(\lambda) I(\lambda) dz \quad (2.3)$$

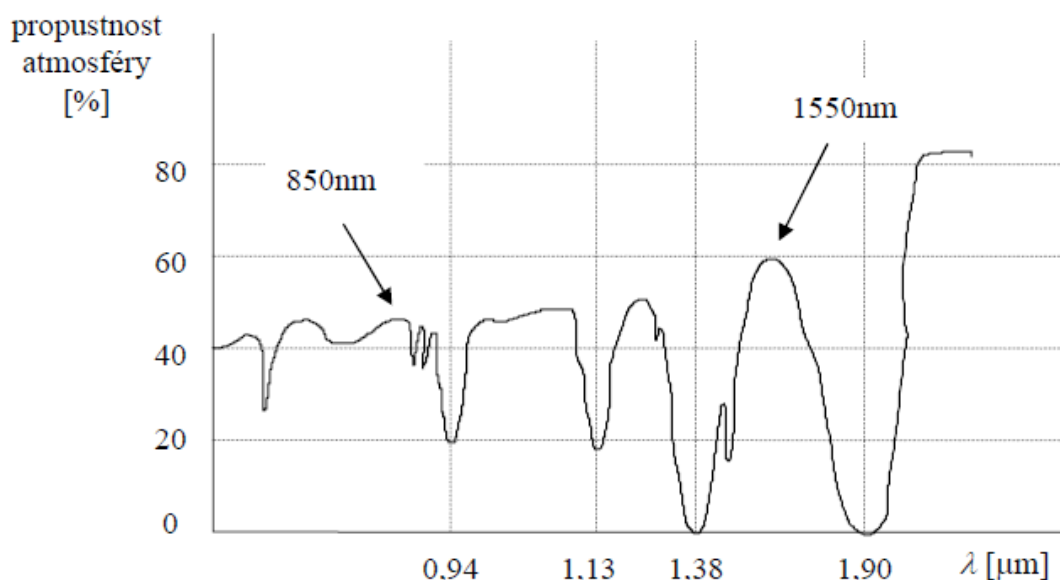
Kde  $dI(\lambda)$  značí zeslabenou optickou intenzitu na spektrální složce  $\lambda$  při průchodu záření vrstvou atmosféry o tloušťce  $dz$ .  $\alpha(\lambda)$  je koeficient zeslabení v  $[m^{-1}]$ . Pokud použijeme integračních úprav, dostaneme:

$$I_2(\lambda) = I_1(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda)\Delta_z] \quad (2.4)$$

Kde  $I_1$  je optická intenzita umístěna na začátku vrstvy a  $I_2$  je optická intenzita na konci vrstvy tloušťky  $\Delta_z$ . Předpokládáme, že konstantní hodnota extinkce je na celé ploše vrstvy  $\Delta_z$ .

Spektrální propustnost  $T_\lambda(\lambda)$  se definuje vztahem:

$$T_\lambda(\lambda) = \frac{I_2(\lambda)}{I_1(\lambda)} \quad (2.5)$$



Obrázek 2.3: Spektrální závislost propustné a čisté atmosféry. [1]

Atmosférické přenosové prostředí je součástí troposféry. V troposféře probíhá kondenzace vodních pár, tvorba mlh a oblak. Vznikají zde sněhové bouře, déšť, bouřky a pro nás nejvíce zajímavé turbulence.

Dalším výrazným jevem ovlivňující optické atmosférické komunikace jsou turbulence, které vznikají proměnlivou rychlostí proudění větru. Turbulentní proudění v atmosféře vykazují chaotické fluktuace v prostoru a čase, přičemž vytvářejí nepředvídatelné změny rychlosti



proudění, hustoty nebo teploty atmosféry, to vede ke změnám v indexu lomu. Ten se pak stává náhodnou veličinou v čase a prostoru, což negativně ovlivňuje optický svazek.

Lokální teplota a tlak ovzduší se mění jak v prostoru, tak i v čase. Tímto získáváme náhodnou funkci souřadnic prostoru a času indexu lomu atmosférického přenosového prostředí.

Pokud šíříme svazek, můžeme především očekávat různé jevy, které nám budou na svazek působit. Jsou to extinkce, fluktuace.

Extinkce neboli absorpce udává, jak moc světla bylo pohlceno. Ve svazku rozeznáváme extinkci vlivem absorpce a rozptylu na molekulách nebo aerosolech. Také můžeme pozorovat extinkci optické intenzity vlivem turbulence troposféry.

Fluktuace znamená nepravidelný pohyb. V současnosti se užívá hlavně v pro nepravidelné změny určité veličiny. Pro nás lze fluktuaci vysvětlit jako vítr v přítomnosti teplotního gradientu, který vytváří výkyvy v atmosférickém indexu lomu. Tu lze také definovat, jako fluktuaci indexu lomu vyplývající z malých teplotních fluktuací. Chování turbulence se dá popsat statistickým způsobem. Aby však bylo možné použít tento popis, je nutné předpokládat, že pole, ve kterém k turbulentním dochází, je statisticky homogenní. Toto pole je nahodilé, jeho průměrná hodnota je však konstantní. Popis chování optické vlny v oblastech turbulentí lze rozdělit do dvou kategorií – slabé a silné výkyvy. Slabé jsou založeny na Rytovových odhadech a pro jejich lepší pochopení se využívají matematické modely. Tyto modely jsou založeny na přísných omezeních hlavně v oblasti nezářivých výkyvů.

Ve svazku rozeznáváme fluktuaci vlivem turbulence troposféry, působením deště nebo sněhu a také vlivem deformace svazku.

Útlum optické intenzity v atmosférickém přenosovém prostředí je možno stanovit podle koeficientu útlumu. Je třeba dosadit délku svazku, který je v APP. Pro koeficient útlumu platí

$$\alpha_{1,app} = \frac{-1}{L_{app}} 10 \log \frac{I_2}{I_1} \quad (2.6)$$

Samozřejmě můžou svazek přerušovat další vlivy, jako třeba letící pták či jiný podnět. Kvalita komunikace optickým bezkabelovým spojem je závislá na atmosféře. Základními atmosférickými jevy jsou útlum a turbulence. [1]

### 2.1.6 Turbulence

Turbulence nás doprovází na každém kroku, u některých případů je tento proces vítaný u některých nikoliv. Pokud chceme promíchat dvě tekutiny, tak nám turbulence napomáhá. Rovněž při rozpouštění dvou tekutin jsou vlastnosti turbulence nezbytné. Napomáhá biologickým nebo chemickým výzkumům, které jsou součástí našeho ekosystému. Také se využívá v atomové fyzice.

Existuje ovšem i nespočet druhů turbulencí, u kterých bychom se bez ní raději obešli. Stačí poukázat na nebezpečí pro letectvo.

Rozeznáváme dva druhy proudění kapalin a plynů, můžeme je nazvat jako dva základní režimy a to proudění laminární a proudění turbulentní. Tyto dva režimy jsou vlastnosti samotného proudění.

Laminární proudění můžeme charakterizovat rovnoběžnými proudovými čarami, zatímco proudění turbulentní má mnohem složitější strukturu. Tyto režimy se popisují pohybovými rovnicemi a to Navierovými a Stokesovými. Jde o parciální diferenciální rovnice nelineárního typu.

Pokud použijeme na vztah k proudění v zemské atmosféře, má turbulence velice zásadní význam. Aby proudění nabylo turbulentního charakteru, musí poměr setrvačných sil k silám, které vznikají v proudící tekutině působením vnitřního tření mezi proudícími vrstvami tekutiny, u kterých lze pozorovat odlišné rychlosti, překročit kritickou hodnotu. Tento poměr můžeme vyjádřit pomocí bezrozměrného čísla zvané Reynoldsovo. Atmosféra lze popsat velice intenzivním pohybem. [5]

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} \quad (2.7)$$

Kde  $d$  [m] značí průměr otvoru například průměr vstupu,  $V$  [ $m \cdot s^{-1}$ ] je rychlost proudění a  $\nu$  [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ] označuje viskozitu média. [20]

Ve vztahu k proudění v zemské atmosféře má turbulence zcela zásadní význam. K tomu, aby proudění nabylo turbulentního charakteru, musí poměr v něm působících setrvačných sil k silám vazkým (vznikajícím v proudící tekutině působením vnitřního tření mezi rovnoběžně proudícími vrstvami tekutiny s odlišnou rychlostí) překročit jistou kritickou hodnotu. Tento poměr je v hydrodynamice a aerodynamice představován bezrozměrným Reynoldsovým číslem. Pokud jeho hodnota překročí kritickou mez, nastávají podmínky pro vznik turbulentního proudění. Při reálně se vyskytujících režimech atmosférického proudění je tato podmínka splněna prakticky vždy, a proudění tedy má turbulentní charakter. Souvisí to s tím, že atmosférické prostředí se vyznačuje relativně malou vazkostí a poměrně intenzivním pohybem. [14]

Vznik turbulence souvisí s působením tečných třecích sil a zároveň při působení Archimédových vztlakových sil. Tyto síly musí mít nerovnoměrné rozložení teploty vzduchu. Hlavním faktorem, který rozhoduje je hodnota vertikálního gradientu teploty. Při teplotních inverzích hraje roli tlumící role. Vliv mají rovněž vrstvy vzduchu. [5]

### 2.1.7 Rozdělení turbulencí

Atmosférická turbulence může vytvářet nepředvídatelné změny neboli fluktuace. Díky fluktuacím se vyskytují odchylky indexu lomu. Jelikož jde o náhodný jev, je index lomu náhodnou veličinou polohy a času.

Podle charakteru lze rozdělit atmosférické turbulence následovně:

- Mechanické - vznikají prouděním vzduchu přes překážky jako jsou stromy, domy, sloupy, skály apod.
- Termické - vznikají díky ohřívání vzduchové vrstvy, která je blízko povrchu naší země, která má teplotu vyšší, než je teplota okolí. Nad povrchem se tvoří malé teplotní útvary, s vyšší teplotou. Ty stoupají do vyšších vrstev atmosféry. Ve větší výšce se stávají z těchto útvarů teplotní masa. Rozdílná teplota mění i index lomu a tím se přispívá k fluktuaci atmosféry.

Matematický popis turbulence je velice složitý. Pro zjednodušení byl vyvinut Kolmogorův model viz [21].

Kolmogorův model lze aplikovat například na výpočet fluktuace rychlosti větru a fluktuaci teploty. [20]

## 2.2 Polarizace

Polarizace světla je určena směrem vektoru intenzity elektrického pole  $\varepsilon(r, t)$  a jeho závislostí na daném čase. Pro monochromatické světlo platí sinusová časová změna tří složek vektoru  $\varepsilon(r, t)$ . Jejich amplitudy a fáze jsou přitom obecně různé, takže se v každém místě  $r$  pohybuje koncový bod vektoru  $\varepsilon(r, t)$  v rovině v níž opisuje elipsu. Rovina, orientace a tvar elipsy závisí na poloze.

V paraxiální optice se světlo ovšem šíří ve směrech, která leží v úzkém kuželu, jehož osa je totožná s optickou osou (osa  $z$ ). Vlna se zde nazývá elipticky polarizovaná.

Orientace a excentricita elipsy stanovují stav polarizace optické vlny, zatímco její rozměry jsou určeny intenzitou světla. Je-li ovšem elipsa degradovaná na přímku, nazýváme potom vlnu lineárně polarizovanou, pokud se stane kružnicí, platí pro ni, že je kruhově polarizovaná.

Uvažujme monochromatickou rovinnou vlnu frekvence  $\nu$ , která se šíří ve směru rychlosti  $c$ . Vektor elektrického pole leží v rovině  $x - y$  a je obecně popsán vztahem:

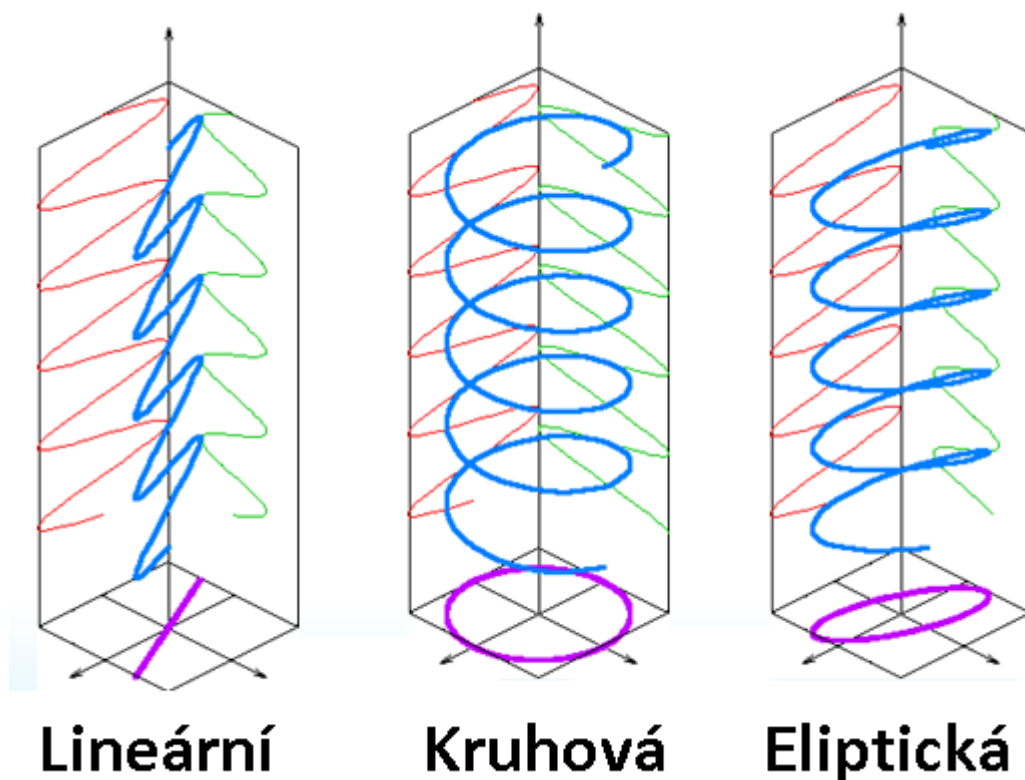
$$\varepsilon(z, t) = \operatorname{Re} \left\{ A \exp \left[ j 2 \pi \nu \left( t - \frac{z}{c} \right) \right] \right\} \quad (2.8)$$

K popsání polarizace této vlny najdeme koncový bod vektoru  $\varepsilon(z, t)$  v každém místě  $z$ , jako funkci času.

Polarizační stav vlny je určen tvarem elipsy (směrem od hlavní poloosy a excentricitou, nebo poloměrem vedlejší poloosy k hlavní poloose elipsy).

Pro lineárně polarizované světlo platí, že musí vymizet jedna ze složek, pak je světlo polarizované ve směru druhé složky. Vlna je rovněž lineárně polarizovaná. V těchto případech válcová plocha eliptického průřezu degeneruje rovinu. Říkáme tedy, že vlna je polarizovaná v rovině, viz obr. 2.4

Pro kruhově polarizované světlo platí, že musí válcová plocha s eliptickým průřezem přejít na válcovou plochu s kruhovým průřezem. Potom můžeme tvrdit, že vlna je kruhově polarizovaná. V případě  $\varphi = +\pi/2$  rotuje elektrické pole v daném místě  $z$  ve smyslu otáčení hodinových ručiček, díváme-li se proti směru postupu vlny. Potom můžeme tvrdit, že světlo je pravotočivě kruhově polarizované. Případ  $\varphi = -\pi/2$  odpovídá rotaci proti směru hodinových ručiček a hovoříme o levotočivě kruhově polarizovaném světle, viz obr. 2.5.



Obrázek 2.4: Druhy polarizovaných světél. [12]

### 2.2.1 Polarizační vlastnosti

V kapitole 2.2 byl zmíněn pojem polarizační elipsa. Tato elipsa slouží k vizualizaci polarizačního stavu optického záření. Tuto elipsu můžeme vyjádřit příčnými složkami intenzity elektrického pole  $E$ , které nelze přímo pozorovat. Proto byly použity pro určení polarizační elipsy matematické postupy z měřitelné veličiny intenzity optického záření  $I$  úměrné  $|E_0|^2$ . Pro popis a zobrazení těchto jevů matematicky popíšeme tyto pojmy:

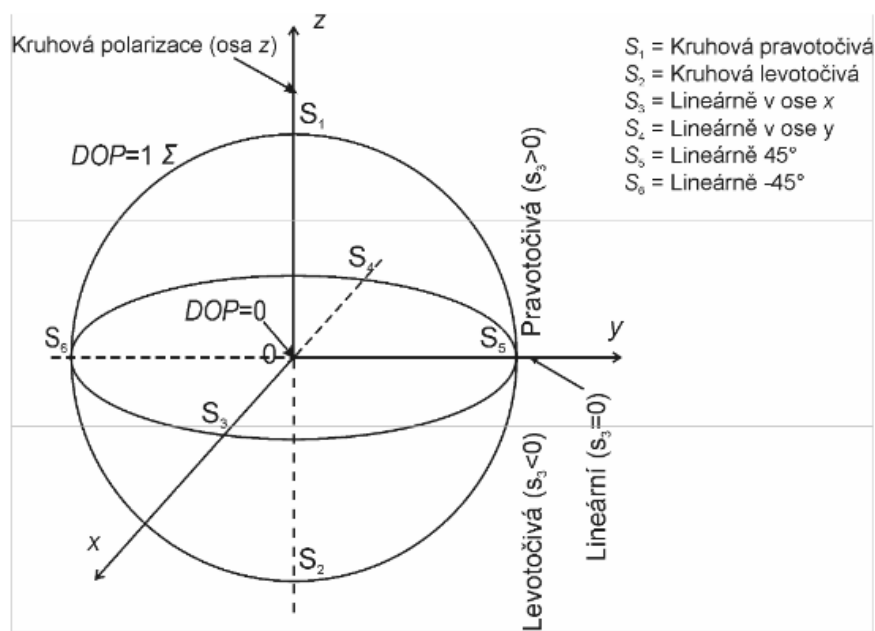
- Stokesův vektor
- Poincarého koule

Stokesův vektor popisuje míru intenzity optického záření, které je pozorovatelnou a měrnou veličinou. Stokesův vektor lze zapsat po předchozích úpravách polarizačních rovnic dle [13] ve sloupcovém tvaru dle obr 2.5:

$$S = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \\ E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \\ 2E_{0x}E_{0y} \cos \delta \\ 2E_{0x}E_{0y} \sin \delta \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Prvky Stokesova vektoru můžeme definovat jako:

- $S_0$  - celková intenzita optické vlny
- $S_0$  - intenzita s horizontální preferencí
- $S_2$  - intenzita s preferencí  $45^\circ$
- $S_3$  - intenzita pro pravotočivou kruhovou preferenci



Obrázek 2.5: Zobrazení polarizačních stavů vlny v Poincaréově kouli. [15]

Pokud měříme s lineárním polarizátorem s čtyřvlnou fázovou destičkou posunutou o  $\lambda/4$  můžeme pozorovat čtyři orientace neboli Azimuty.

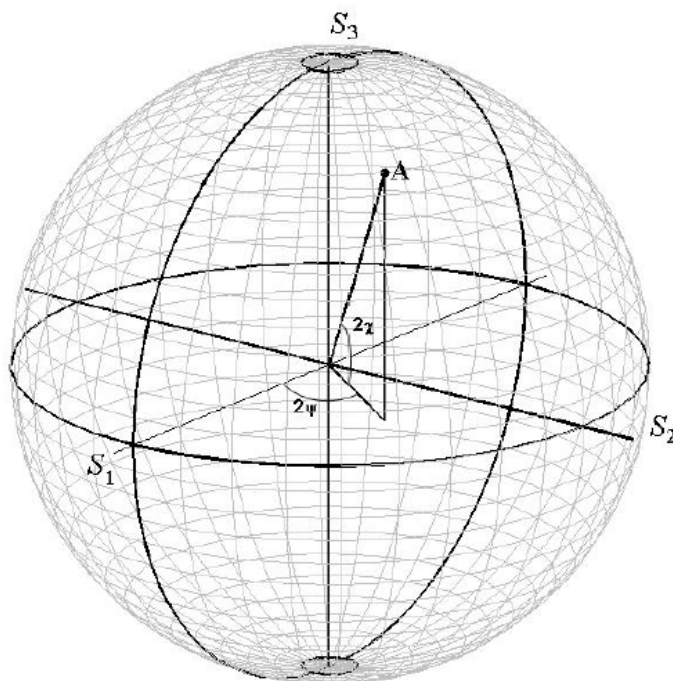
- Azimut  $0^\circ$  (horizontální orientace)
- Azimut  $90^\circ$  (vertikální orientace)
- Azimut  $+45^\circ$
- Azimut  $-45^\circ$

Poincaréova koule, viz obr 2.6, slouží ke grafickému zobrazování vývoje polarizace. Umožňuje jak zobrazování vývoje polarizačního stavu, tak poskytuje možnost pro nalezení rychlého řešení a formulaci nových problémů.

Poincaréova koule se zobrazuje v třírozměrné kartézské souřadné soustavě  $x, y, z$ . Pokud interpretujeme Stokesův vektor na Poincaréově kouli, převedou se jeho prvky do

kartézské soustavy. Pro elipticitu  $e = 1$  dostáváme kruhovou polarizaci na pólech Poicaréovy koule. Ostatní hodnoty elipticity prezentují eliptickou polarizaci a leží mezi rovníkem a póly.

Horizontální polarizace (azimut) se nachází v  $S_1$  a vertikální je protilehlém bodě  $-S_1$ . Lineární polarizace, která má orienzaci  $+45^\circ$  je prezentována v  $S_2$ . Prvek Stokesova vektoru  $S_0$  je prezentován jako poloměr Poincarého koule. Pokud potřebujeme přirovnat souřadnici  $x$ , můžeme ji přirovnat k prvku  $S_1$ , prvku  $S_2$  odpovídá  $y$  a logicky prvku  $S_3$  odpovídá  $z$ . Pokud máme protilehlé body můžeme jim přiřadit souřadnice se záporným znaménkem, které jim přísluší.



Obrázek 2.6: Poicarého koule. [13]

Úhly, které popisují elipticitu, a azimut se prostřednictvím kartézských souřadnic vyjadřují v následujícím tvaru:

$$\sin 2\chi = \frac{Z}{1} = Z \quad -\frac{\pi}{4} \leq \chi \leq \frac{\pi}{4} \quad (2.10)$$

Pro stupeň polarizace (DOP) platí:

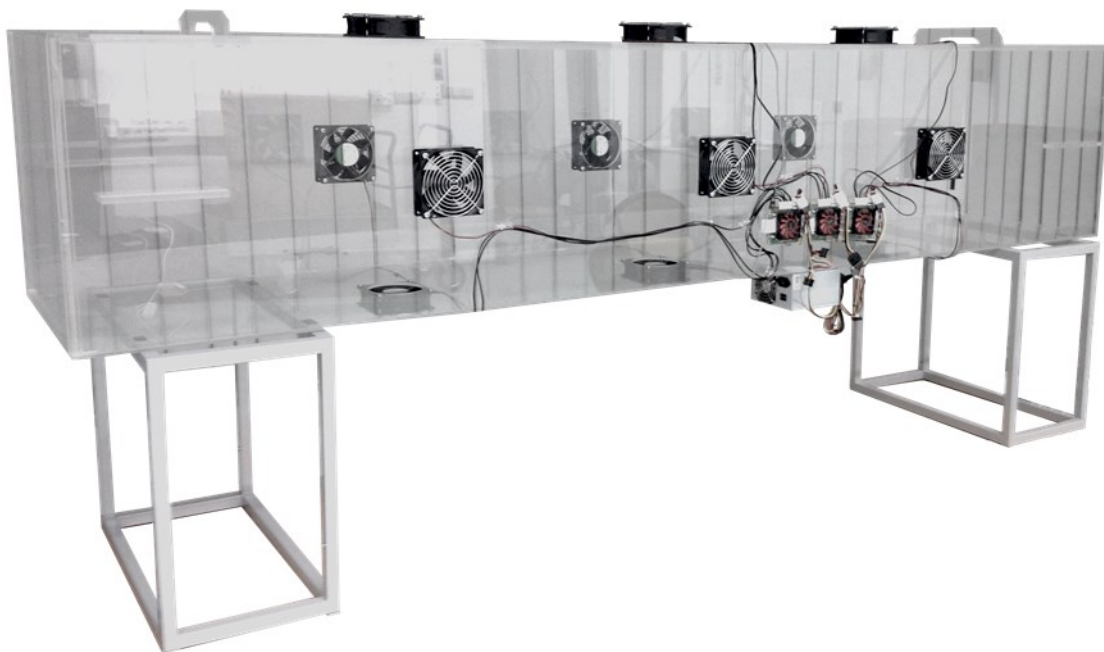
$$DOP = \sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}{S_0^2}} \quad (2.11)$$

Pokud má DOP stupeň 0, lze ho popsat jako nepolarizované záření, kdežto plně polarizované záření má stupeň 1. Lze se orientovat i podle procent, kdy 0% přísluší nepolarizovanému záření a 100% plně polarizovanému záření. [13] [15]

### 3 Měření a simulace atmosférických jevů na optický svazek

#### 3.1 Simulační komora

Veškeré měření v této bakalářské práci probíhalo v simulační komoře. Jde o box, který je vyrobený z plexiskla a je určený pro simulaci atmosférických jevů. V komoře lze simulovat jak mechanické, tak termické turbulence, a to za pomoci několika ventilátorů typu SUNON s výkonem 19,2 W.



*Obrázek 3.1: Simulační komora*

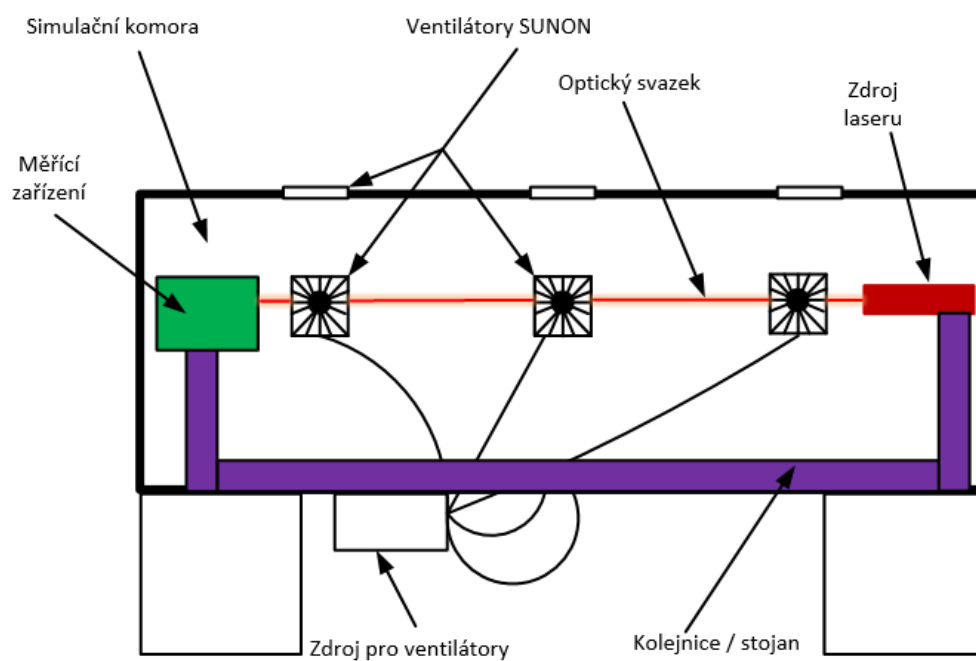
Simulační komora byla používána k měření optického svazku, který se šířil ve středu simulační komory. Optický svazek byl simulován pomocí různých druhů laserů, které budou popsány níže. Za pomoci ventilátorů, které lze vidět na obr. 3.1, byly simulovány turbulence. Ventilátory byly vždy aktivovány podle současného druhu měření. Pokud bylo třeba simulovat termické turbulence, pro které byly využity termostaty Empire, viz obr. 3.2.

Veškeré měření proběhlo ve dvou experimentálních uspořádáních. První uspořádání proběhlo tím způsobem, že veškeré měřicí přístroje, zdroje apod. byly situovány uvnitř komory, spolu se svazkem. Druhé uspořádání znamenalo, že zařízení byly umístěny mimo komoru a optický svazek byl směřován do komory přes plexisklo, kterým svazek prošel, a v samotné komoře nebyla žádná překážka, která by na něj měla vliv. Zjednodušené schéma lze vidět na obr.3.3.

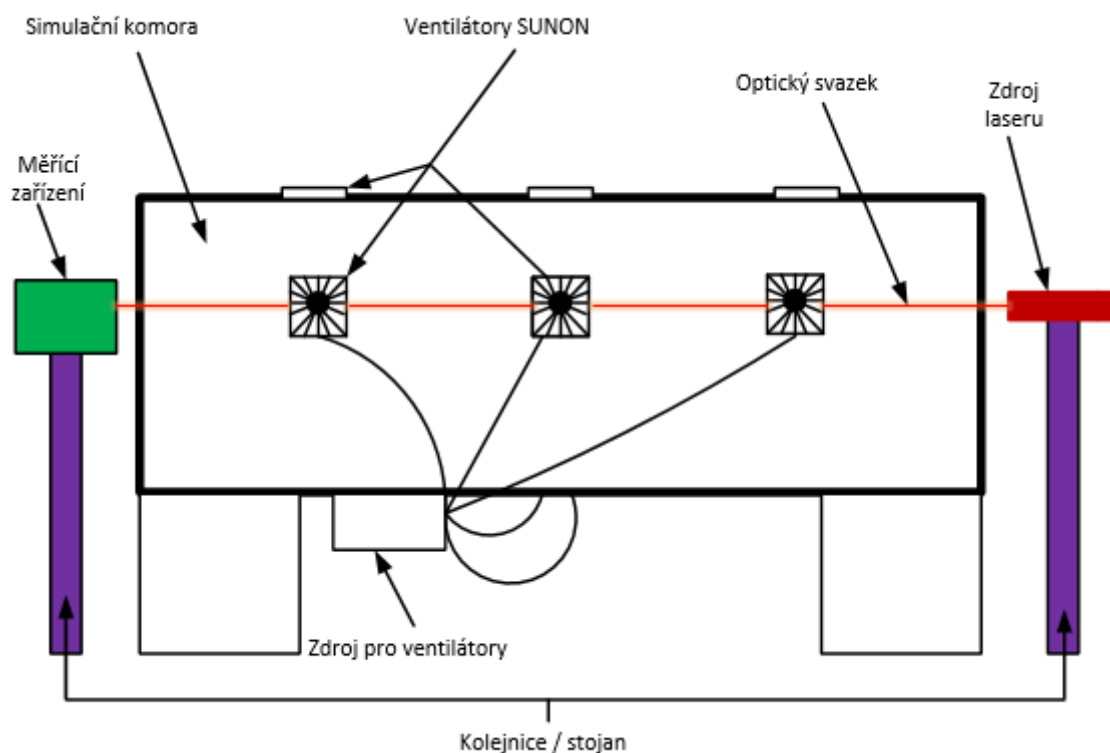




Obrázek 3.2: Vytváření termických turbulencí



Obrázek 3.3: Experimentální uspořádání měřicích přístrojů uvnitř komory



Obrázek 3.4: Experimentální uspořádání měřicích přístrojů mimo komoru

Po celou dobu měření byly dodrženy tyto dva způsoby, protože bylo potřeba vyzkoušet, jak moc narušují optický svazek přístroje, včetně kolejnice určené pro manipulaci s polohou zařízení. Cílem bylo vyzkoušet, jakého rozsahu mají tyto dvě umístění vliv na optický svazek. Rovněž byly tyto nákresy používány jako schéma pro měření a je na ně odkazováno v rámci celé práce.

### 3.2 Měření polarizace polarimetrem

Jako první měření bylo provedeno měření polarizace za pomoci přístroje zvaného polarimetr, od firmy Thorlabs. [16]

### 3.2.1 Úvod do měření

Určit vliv atmosférických vlivů na optický svazek je možné za pomoci měření polarizace. K tomu slouží přístroj zvaný polarimetr, umožňující změřit polarizační stavy (azimut a elipticitu) a také stupeň polarizace DOP. Polarimetr lze aplikovat i na tyto funkce:

- polarimetrie
- polarizační analýza různých optických komponent
- měření extinkčního poměru v polarizaci zachovávajících vláknech
- měření polarizační módové disperze a polarizačně závislých ztrát

V měření je dostačující pouze měření polarizačních stavů a stupňů polarizace. Pro pochopení principu polarimetru jsou zásadní znalosti a důkladné prostudování kapitoly 2.2.

Aby bylo vůbec možné správně měřit působení atmosférických vlivů na optický svazek, je potřeba tyto jevy správně nasimulovat. Atmosférické jevy jsou popsány v kapitole 2.1.

V měření byly použity tři stavy simulace atmosférických jevů:

- klidový stav
- stav maximální turbulence
- stav maximální termické turbulence

Klidový stav znamená, že optický svazek během měření v komoře prakticky nic nenarušovalo a na svazek nepůsobil žádný simulovaný vliv. Při stavu maximální turbulence byly zapnuty tři ventilátory, umístěné na simulační komoře ve směru z levé strany do pravé od laserového zdroje. Tímto na optický svazek působily turbulentní vlivy. Při stavu termické turbulence byly ventilátory umístěny před dodatečné termostaty, viz obr. 3.2. Teplota na výstupu bílého termostatu značky Empire, byla 114°C. U černého termostatu značky Solac byla teplota na výstupu 110°C. Tyto stavy byly měřeny v různých časových odstupech, viz kapitola 3.2.3.

### 3.2.2 Použité přístroje a pomůcky

- polarimetr Thorlabs PAX5710
- laser pracující na vlnové délce  $\lambda = 1550 \text{ nm}$  s výkonem 15 mW
- simulační komora
- softwarové vybavení od firmy Thorlabs a externí software PAX
- terč pro směřování svazku
- 6x ventilátor SUNON PDM 1212PBM 1-A DC12V, 19.2W
- 2x bílý termostat EMPIRE CTH-500 230V ~50 Hz, input power 2000W
- 1x černý Termostat SOLAC s.a. 230V ~50 Hz, input power 2000W

Fotografická dokumentace jednotlivých přístrojů a pomůcek je umístěna v příloze A.

### 3.2.3 Popis měření

Samotná měření za klidu, turbulence a termické turbulence bylo nutno provést v různých časových úsecích, a poté za pomoci explorační analýzy vypočítat nejvíce optimální měření (měření s nejmenšími odchylkami). Bylo vycházeno z hodnot azimutu a elipticity. Měření bylo provedeno v následujících časových úsecích:

- 5 minutové měření
- 15 minutové měření
- 30 minutové měření

Celkem bylo třeba provést pro polarizaci osmnáct měření. Tři měření pro každý časový interval s různou simulací atmosférických jevů dalo dohromady devět měření. Nakonec dle obr. 3.3 a obr. 3.4 byly vyměněny uspořádání přístrojů a znovu vykonáno devět měření.

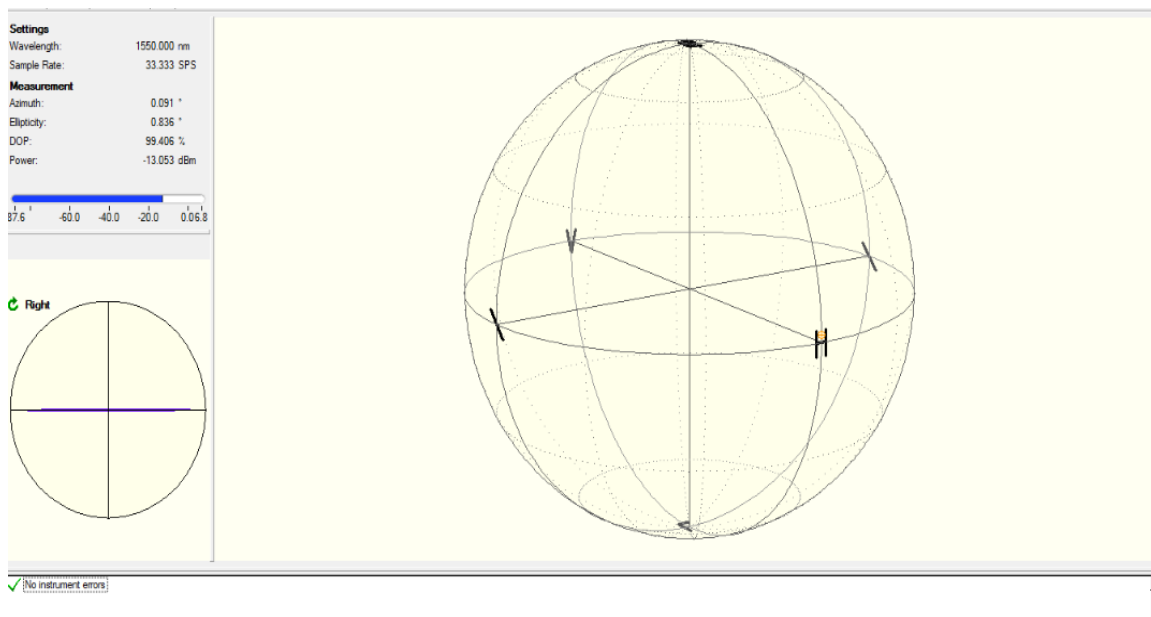
Příprava měření probíhala tak, že byl polarimetr a laser umístěn na vhodné místo do nebo před simulační komoru. Dle způsobu měření (obr. 3.3 a obr. 3.4) byla poloha zařízení důkladně proměřena, aby byla správná (ve středu komory). Poté byl zapnut laser, aby byl vhodně směřován optický svazek a jeho poloha byla upravena za pomoci polohovacích a směrovacích zařízení a mikroposuvů. Svazek bylo nutné nasměrovat přímo do středu polarimetru. K správnému nasměrování svazku byl používán speciální terč, na kterém lze vidět tečku laseru, který je jinak pro lidské oko neviditelný, jelikož jeho vlnová délka je 1550 nm. Výstupní polarizace byla pozorována, pomocí softwaru polarimetru viz obr. 3.5. Bylo kontrolováno, zda je azimut nasměrován co nejbližší k nule, aby viditelnost změn polarizačních stavů byla co nejlepší. Rovněž bylo nutné nasměrovat paprsek tak, aby měl výkon co nejlepší hodnotu. Jako vhodný výkon, který zajistí optimální měření je hodnota nad -20 dBm, tedy co nejbližší k nule. Pokud by byl výkon nižší než -20 dBm, mohl by se výsledek zkreslovat a měření by nebylo dostatečně přesné. Na obr. 3.5 lze vidět dobře nachystané měření. Polarizační stupeň DOP je na 99,406% což je téměř plně polarizovaný stupeň. K veškeré přípravě byl používán originální software od firmy Thorlabs.

Jakmile bylo měření připraveno, bylo nutné mít v místnosti se simulační komorou absolutní klid. Každý sebemenší otřes v místnosti nebo dokonce v budově má za následek výkyvy při měření. Tyto výkyvy byly pomocí statistiky, viz kapitola 3.2.4, odhaleny a následně zanedbány.

Samotné měření probíhalo v externím programu PAX, jelikož software od firmy Thorlabs nedokáže exportovat naměřená data k dalšímu zpracování. Program PAX, který pracuje na téměř stejném principu, tuto funkci podporuje. Při měření byly monitorovány tři veličiny: Azimut, elipticita, a DOP. Viz kapitola 2.2.1 a [13] [15].

Následně byly provedeny jednotlivé typy měření pro dané časové úseky. Měření pětiminutové nám poskytlo patnáct tisíc hodnot, měření patnáctiminutové čtyřicet tisíc hodnot

a měření třicetiminutové devadesát tisíc hodnot. Na tyto hodnoty bylo nutné použít explorační analýzu, viz kapitola 3.2.5.



Obrázek 3.5: Poincaréova kole - příprava měření

### 3.2.4 Základní pojmy explorační analýzy

Jako první si probereme základní pojmy statistiky, se kterými budeme pracovat:

- aritmetický průměr
- rozptyl
- směrodatná odchylka
- variační koeficient
- medián a kvantily
- box-plot

Aritmetický průměr je definován jako součet všech hodnot náhodné proměnné  $x_i$  dělený počtem hodnot. Vypočtený průměr pak udává, jaká stejná část z úhrnu hodnot sledované číselné proměnné připadá na jednu jednotku souboru (jednoho jedince).

Rozptyl můžeme definovat jako aritmetický průměr čtverců odchylek jednotlivých hodnot sledované proměnné  $x$  od průměru celého souboru. Velikost rozptylu se zvyšuje při zvětšující se variabilitě hodnot sledované proměnné. Rozptyl je odvozen od součtu čtverců odchylek jednotlivých hodnot od průměru souboru, proto nemůže nikdy nebývat záporných hodnot. Jestliže jsou všechny hodnoty souboru stejné, potom je variabilita hodnot sledované proměnné v souboru nulová

Směrodatná odchylka je definována jako (kladná) druhá odmocnina z rozptylu. Její vlastnosti jsou stejné měrné jednotky jako sledovaná číselná proměnná ve statistickém souboru a nabývání vždy kladných hodnot.

Medián můžeme definovat jako 50 % kvantil, což je taková hodnota variační řady uspořádané podle velikosti, která rozděluje řadu na dvě stejně velké části co do počtu hodnot tak, že hodnoty dané proměnné v jedné části jsou menší (případně rovny) než medián, v druhé pak větší než medián. V naší statistice budeme používat i kvantily 25% a 75%. Je to tedy prostřední hodnota variační řady souboru v případě lichého počtu hodnot v řadě. Při sudém rozsahu souboru existují dvě prostřední hodnoty variační řady. V tomto případě se medián definuje jako aritmetický průměr (poloviční součet) těchto dvou prostředních hodnot.

Variační koeficient je vhodný pro vzájemné srovnávání variability dvou nebo více souborů s podstatně odlišnou úrovní hodnot. V těchto případech musíme odstranit vliv obecné úrovně daných hodnot. Děláme to tak, že směrodatnou odchylku dělíme střední hodnotou, od které byly počítány odchylky pro součet čtverců, obvykle tedy při praktických výpočtech aritmetickým průměrem výběrového souboru. Výsledek se obvykle vyjadřuje v procentech [18].

Box-plot neboli česky krabicový graf se používá pro rozsáhlejší výběry a následně slouží jako vizualizace. Krabicový graf použijeme mimo jiné k identifikaci odlehlých pozorování, která obecně způsobují selhání analýzy rozptylu. Pokud odlehlá pozorování vyskytující se v datech byla způsobena:

- Chybami, překlipy, selháním techniky...
- Poruchy, chyby měření, technologické chyby...

Jelikož naše měření je velice náchylné a citlivé na jakékoliv vnější vlivy, byla aplikace box-plotů výhodná, viz [17].

Veškeré záznamy z měření v portable document format jsou součástí CD přílohy.

### 3.2.5 Explorační analýza pro měření polarizace

V této kapitole jsou zobrazeny základní statistické údaje pro měření polarizace polarimetrem.

První tabulky statistiky patří pro měření dle Obr. 3.3.

Tabulka 3.1: Měření 5 minut za klidového stavu - výsledná statistika

	Průměr	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Variační koeficient	Kvantil 0,25	Kvantil 0,5	Kvantil 0,75
Azimut [deg]	0,13365	0,00914	0,00008	0,00008	0,12935	0,13371	0,13816
Elipťita [deg]	-0,65036	0,01113	0,00012	0,00012	-0,65780	-0,65024	-0,64298
DOP [%]	99,24366	0,04279	0,00183	0,00183	99,21902	99,24382	99,26862

Tabulka 3.2: Měření 5 minut za stavu maximální turbulence - výsledná statistika

	Průměr	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Variační koeficient	Kvantil 0,25	Kvantil 0,5	Kvantil 0,75
Azímút [deg]	-0,15139	0,092907	0,00863	0,00863	-0,21422	-0,15029	-0,08851
Elíptícita [deg]	-0,37985	0,184312	0,03397	0,03397	-0,5069	-0,38043	-0,25168
DOP [%]	99,36909	0,560564	0,31423	0,31423	98,97854	99,37126	99,75997

Tabulka 3.3: Měření 5 minut, za stavu termické turbulence - výsledná statistika

	Průměr	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Variační koeficient	Kvantil 0,25	Kvantil 0,5	Kvantil 0,75
Azímút [deg]	-1,09139	1,47121	2,16447	2,16447	-2,04689	-1,07113	-0,10738
Elíptícita [deg]	0,98168	1,09110	1,19050	1,19050	0,27510	1,05356	1,73951
DOP [%]	99,14442	6,06703	36,80889	36,80889	95,09483	99,05566	103,16670

Statistika pro měření patnácti a třicetiminutové pro tuto experimentální polohu měřicích zařízení je součástí přílohy B.

Na následujících třech tabulkách můžeme vidět statistiku pro měření dle Obr. 3.4.

Tabulka 3.4: Měření 5 minut, za klidového stavu - výsledná statistika

	Průměr	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Variační koeficient	Kvantil 0,25	Kvantil 0,5	Kvantil 0,75
Azímút [deg]	0,08256	0,03318	0,00110	0,00110	0,06894	0,08366	0,09749
Elíptícita [deg]	0,95233	0,05420	0,00294	0,00294	0,91963	0,95256	0,98568
DOP [%]	99,51443	0,17249	0,02980	0,02980	99,41347	99,51217	99,61613

Tabulka 3.5: Měření 5 minut, za stavu maximální turbulence - výsledná statistika

	Průměr	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Variační koeficient	Kvantil 0,25	Kvantil 0,5	Kvantil 0,75
Azímút [deg]	0,06633	0,02031	0,00041	0,00041	0,05352	0,06639	0,07870
Elíptícita [deg]	0,88618	0,02631	0,00069	0,00069	0,86824	0,88626	0,90411
DOP [%]	99,61261	0,11386	0,01300	0,01300	99,53626	99,61121	99,69004

Tabulka 3.6: Měření 5 minut, za stavu termické turbulence - výsledná statistika

	Průměr	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Variační koeficient	Kvantil 0,25	Kvantil 0,5	Kvantil 0,75
Azímút [deg]	0,01174	1,55586	2,42000	2,42000	-1,02471	0,00310	1,03764
Elíptícita [deg]	0,75925	0,71300	0,50800	0,50800	0,28005	0,75892	1,23396
DOP [%]	99,98798	5,82190	33,90000	33,90000	96,07163	99,83712	103,77433

Statistika pro měření patnácti a třicetiminutové pro tuto experimentální polohu měřicích zařízení je součástí přílohy B.

Tabulka 3.7: Srovnávací tabulka pro pětiminutové měření dle obr. 3.3.

	Klidový stav		Stav turbulence		Stav termické turbulence	
	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Směrodatná odchylka	Variační koeficient
Azimut [deg]	0,00914	0,00008	0,092907	0,00863	1,47121	2,16447
Eliplicita [deg]	0,01113	0,00012	0,184312	0,03397	1,09110	1,19050
DOP [%]	0,04279	0,00183	0,560564	0,31423	6,06703	36,80889

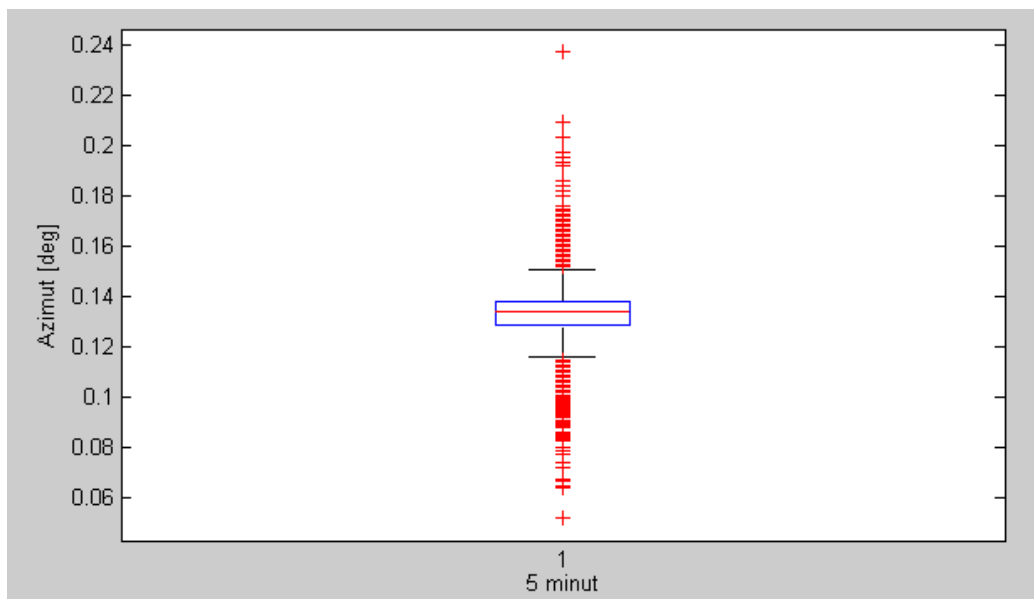
Tabulka 3.8: Srovnávací tabulka pro pětiminutové měření dle obr. 3.4.

	Klidový stav		Stav turbulence		Stav termické turbulence	
	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Směrodatná odchylka	Variační koeficient
Azimut [deg]	0,03318	0,00110	0,02031	0,00041	1,55586	2,42000
Eliplicita [deg]	0,05420	0,00294	0,02631	0,00069	0,71300	0,50800
DOP [%]	0,17249	0,02980	0,11386	0,01300	5,82190	33,90000

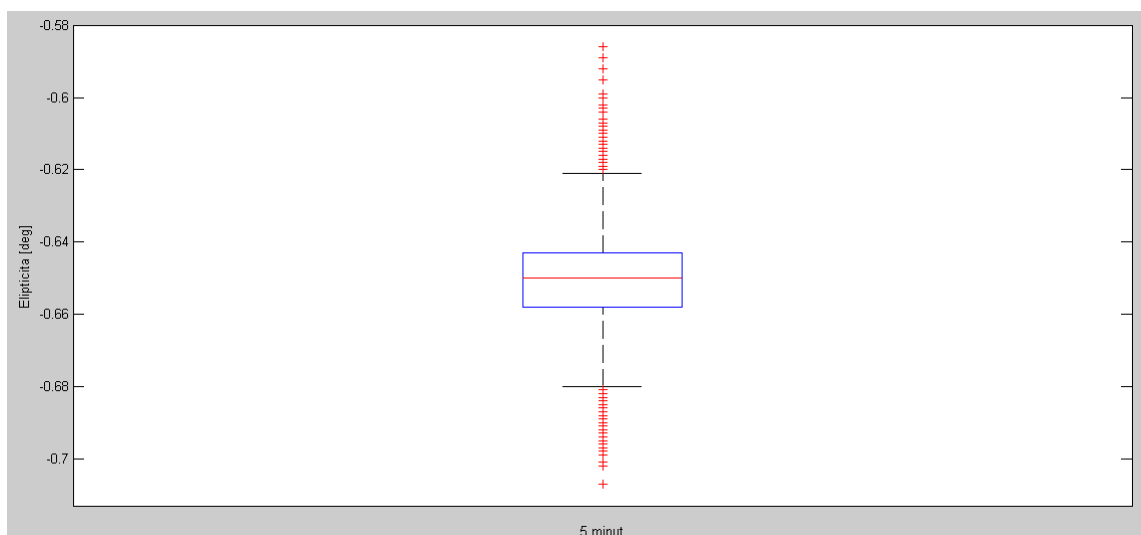
V další části je demonstrováno několik box-plotů. Na těchto grafech lze jasně a zřetelně vidět jak chyby měření, tak i rozdílné vlivy atmosférických jevů. Pro generaci box-plotů byl použit software Matlab.

Celková explorační analýza pro měření polarizace se nachází v příloze B.





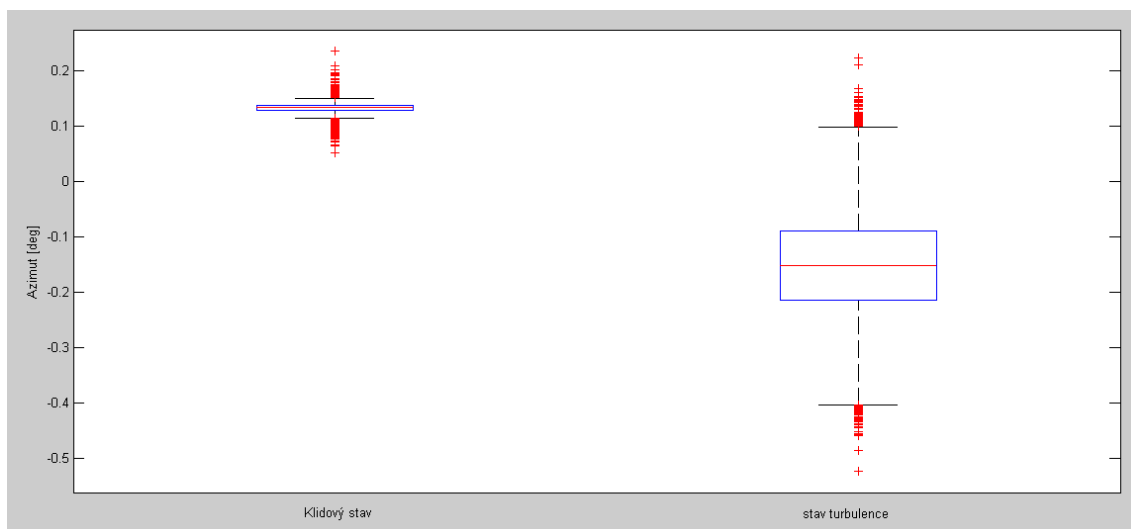
Obrázek 3.6: Box-plot pro azimut při pětiminutovém měření v klidovém stavu. Experimentální uspořádání dle obr.3.3.



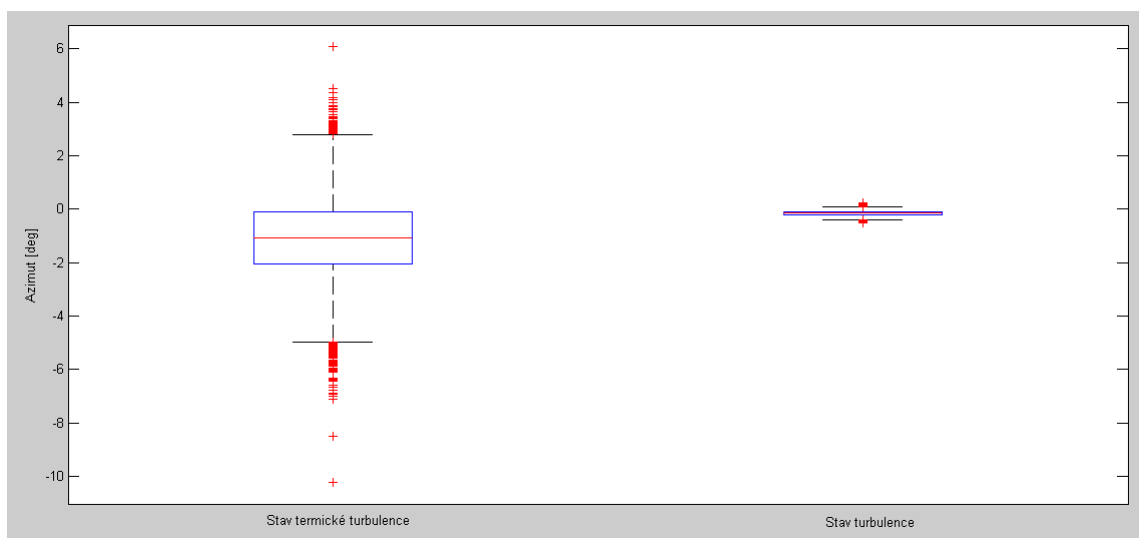
Obrázek 3.7: Box-plot pro elipticitu při pětiminutovém měření v klidovém stavu. Experimentální uspořádání dle obr.3.3.

Červená čára uprostřed grafu značí medián a odkazuje na střed našich hodnot. Křížky umístěné za vnitřními hradbami jsou odlehlá pozorování, tedy body, které značí naše nepřesnosti, výkyvy a chyby v měření.

Pro názornější ukázkou předmětu této bakalářské práce, což jsou atmosférické vlivy na optický svazek, je přiloženo pro srovnání více box-plotů v jednom grafovém rozhraní. Pro ukázkou byla použita pětiminutová měření a polarizační stav azimut.

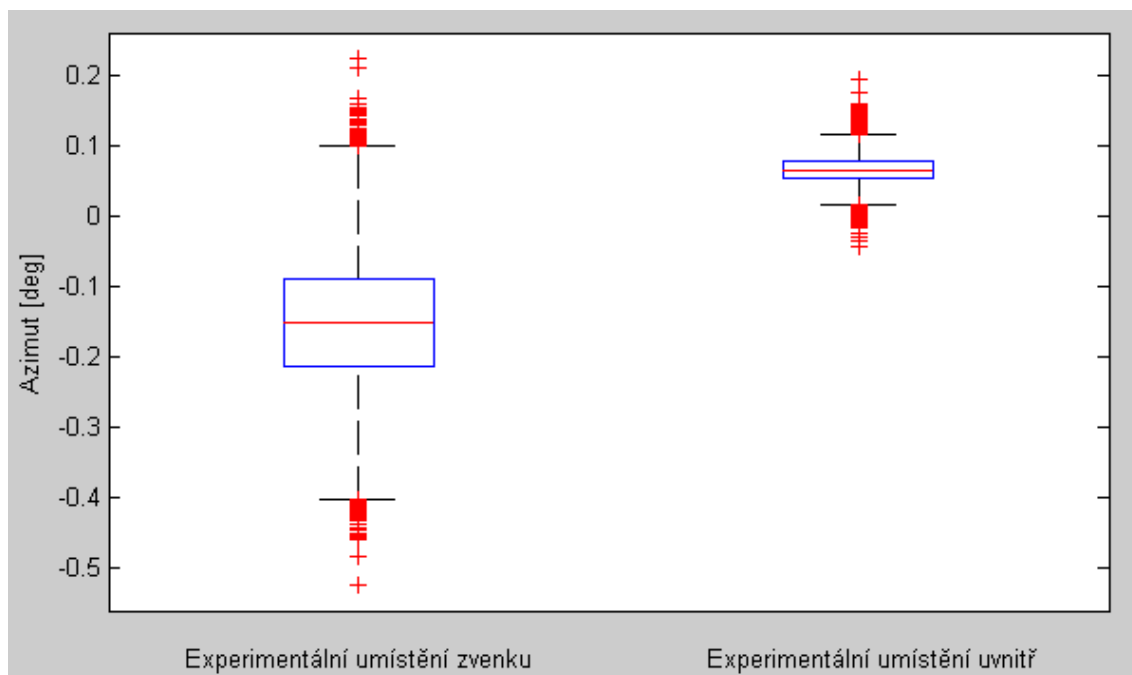


Obrázek 3.8: Demonstrace rozdílu mezi klidovým stavem a stavem turbulence. 5 minutové měření s experimentálním uspořádáním dle obr. 3.3.



Obrázek 3.9: Demonstrace rozdílu mezi stavem termické turbulence a stavem obyčejné turbulence. 5 minutové měření, s experimentálním uspořádáním dle obr. 3.3.

Rovněž lze pomocí box-plotů názorně ukázat rozdíl mezi experimentálním umístěním dle obr. 3.3 a obr. 3.4.



Obrázek 3.10: Demonstrace rozdílu mezi experimentálním umístěním měřicích přístrojů podle obr. 3.3 a obr. 3.4 pro klidový stav.

### 3.3 Měření tvaru svazku pomocí kamery

#### 3.3.1 Úvod do měření

Další možnost, jak měřit atmosférické vlivy, které působí na optický svazek, je využití speciální termo-kamery Cincam. Kamera obsahuje křemíkový čip, a proto je nutné přizpůsobit zdroje záření, aby nedošlo k poškození kamery.

Pokud svazek je správně nasměrován do kamery, je možné provádět měření, při kterém program RayCi promítá osu  $x$  a  $y$ , kde lze vidět fluktuace optického svazku, deformaci optického svazku a spektrum svazku.

Co se týče samotného měření, opět byly měřené totožné stavy jako v předchozím měření. Rozdíl je v tom, že bylo měřeno pro dva různé zdroje záření a pro každý zdroj a každý simulovaný stav bylo provedeno deset. Pokud byly výsledky příliš zkreslené, bylo provedeno několik měření navíc. Výstupem je celkový graf na programu RayCi, převedený do portable document format.

Při měření bylo nutné dodržovat stejná pravidla jako u měření polarizace, a to primárně naprostý klid. Veškeré rušivé vlivy při měření byly okamžitě na výstupním grafu vidět. U tohoto měření bylo nutné měřit ve tmě, světlo by zkreslovalo měření, jelikož se jedná o termo-kameru.

#### 3.3.2 Použité přístroje a pomůcky

- laser pracující na vlnové délce  $\lambda = 850$  nm, s výkonem 5 mW
- helium-Neon laser pracující na vlnové délce  $\lambda = 632,8$  nm, s výkonem 15 mW
- simulační komora
- kamera Cincam CMOS-12-01 <CINOGY> Technické parametry na [19]
- softwarové vybavení pro kameru (program RayCi), externí program PAX
- 6x ventilátory SUNON PDM 1212PBM 1-A DC12V, 19,2 W
- 2x bílý termostat EMPIRE CTH-500 230V ~50 Hz Input power 2000 W
- 1x černý termostat SOLAC s.a. 230V ~50 Hz Input power 2000 W

Fotografická dokumentace jednotlivých přístrojů a pomůcek je umístěna v příloze A.

#### 3.3.3 Popis měření

Příprava měření je totožná s měřením dle kapitoly 3.2.3, ovšem místo polarimetru byla použita kamera Cincam. Příprava byla jednodušší než u polarizace. Na kameře se promítala, termo stopa optického svazku, a tak pomocí vizuálního promítání na programu RayCi byl svazek nasměrován přímo doprostřed kamery. Jakmile byl svazek dostatečně nasměrován přímo doprostřed kamery, nic nebránilo spustit samotné měření. Opět bylo měřeno za klidového stavu,

za stavu mechanické turbulence a za stavu termické turbulence. Jedno měření probíhalo čtyři minuty a deset sekund. Bylo zaznamenáno pět tisíc snímků. Po konzultaci s vedoucím bylo pro každý druh měření provedeno deset samotných měření. Pokud se výsledky zdály příliš zkreslené rušivými vlivy, bylo provedeno několik měření navíc.

Při měření a aktivaci helium-neonového laseru bylo důležité před samotný laser umístit šedý filtr, aby se snížila výkonová hodnota laserového svazku, která by mohla vést k tomu, že by došlo k poškození křemíkového čipu na kameře.

Měření bylo prováděno opět ve dvou experimentálních uspořádání. Experimentální uspořádání je stejné jak v předešlém měření, viz kapitola 3.1.

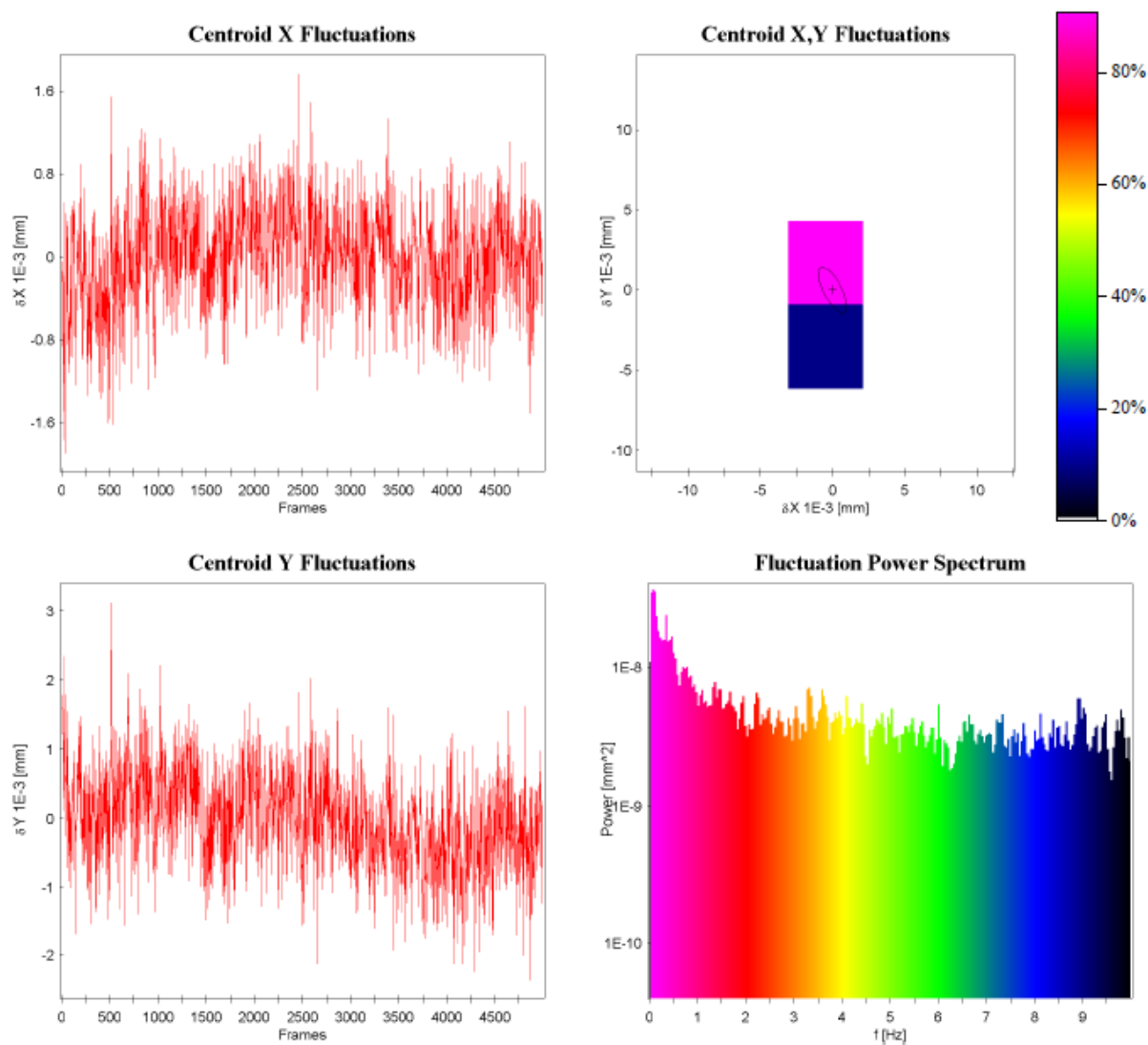
Při měření termo-turbulencí pro laser  $\lambda = 850 \text{ nm}$  s výkonem  $5 \text{ mW}$  při experimentálním umístění zvenku byly aktivovány všechny tři termostaty najednou, jinak byly použity termostaty vždy pro každé měření jen dva.

Ke každé sérii měření je vypracována explorační analýza, která je celkově vypracovaná v příloze C.

Veškeré záznamy z měření v portable document format jsou uvedeny na CD příloze.

### 3.3.4 Příklady výsledků měření a statistiky

V této kapitole jsou ukázány výsledky měření tvaru svazku pomocí kamery. Pro ukázkou byly použity vždy měření č. 1. Jedná se o měření při experimentálním uspořádání dle obr 3.3. V tomto měření byl použit pouze jeden zdroj a to laser  $\lambda = 850 \text{ nm}$  s výkonem  $5 \text{ mW}$ . Na výstupu z programu RayCi lze pozorovat čtyři různé grafy. První dva grafy, které jsou umístěny v levé části, ukazují flukтуаční výkyvy na ose  $x$  a  $y$  [mm]. Další graf umístěný v pravém horním rohu demonstruje deformaci svazku. Graf v pravé části v dolním rohu nám ukazuje intenzitu spektra. Pro ukázkou byla použita měření č. 1 pro klidový stav, stav mechanické turbulence a stav termické turbulence. Rovněž pod grafy je vypracovaná statistika. Statistické údaje generuje přímo program RayCi. Pokud v naměřených datech byla nejistota, o některých měřeních, že by vykazovaly velké chyby, bylo pro jistotu provedeno měření více. Statistika se vyhodnotila vždy z prvních deseti měření.



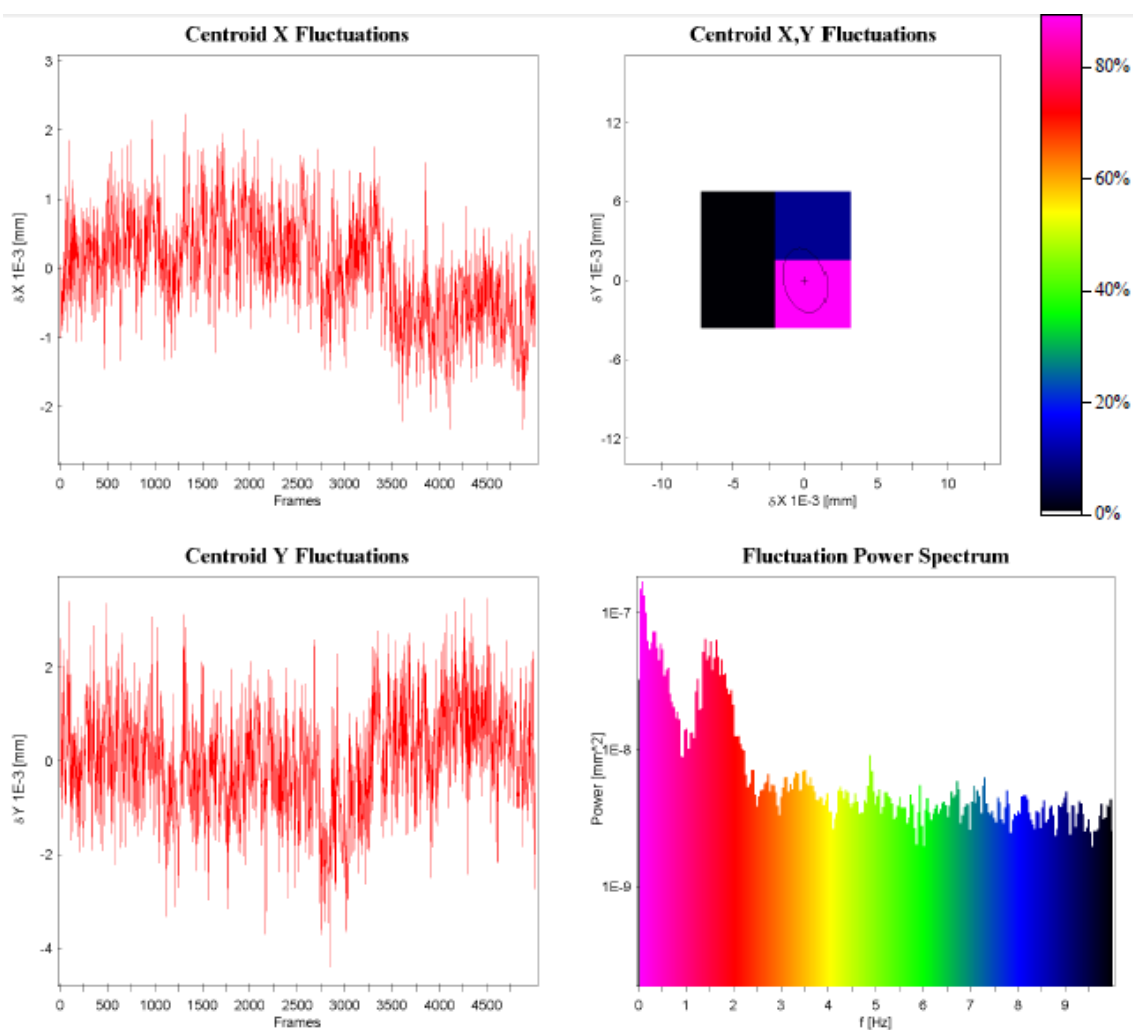
Obrázek 3.9: Výsledek měření pro klidový stav, zdroj  $\lambda = 850$  nm, experimentální umístění dle obr 3.3.

Tabulka 3.9: Výsledná statistika měření pro klidový stav, zdroj  $\lambda = 850$  nm, experimentální umístění dle obr 3.3. (Fluktuace na ose  $x$ ).

Měření Osa X	Minimální hodnota fluktuace [mm]	Maximální hodnota fluktuace [mm]	Směrodatná odchylka [deg]
1	-0,001895	0,001766	0,0004968
2	-0,00228	0,001402	0,0004882
3	-0,001923	0,001385	0,0004354
4	-0,001932	0,001635	0,0004691
5	-0,002759	0,002316	0,0008934
6	-0,00205	0,00184	0,0006524
7	-0,002458	0,001982	0,0006565
8	-0,001781	0,002108	0,0005495
9	-0,002886	0,003084	0,0005602
10	-0,002401	0,001993	0,0005976
<b>Celková statistika</b>			
Průměr	-0,0022365	0,0019511	0,00057991
Medián	-0,002165	0,001911	0,00055485
Rozptyl	0,0000001323	0,0000002212	0,0000000160

Tabulka 3.10: Výsledná statistika měření pro klidový stav, zdroj  $\lambda = 850$  nm, experimentální umístění dle obr 3.3 (Fluktuace na ose  $y$ )

Měření Osa Y	Minimální hodnota fluktuace [mm]	Maximální hodnota fluktuace [mm]	Směrodatná odchylka [deg]
1	-0,002357	0,003124	0,0007129
2	-0,002902	0,002782	0,0006952
3	-0,002714	0,001821	0,0006303
4	-0,002381	0,002865	0,0006494
5	-0,003091	0,002504	0,0007809
6	-0,002275	0,00214	0,0006554
7	-0,002707	0,002155	0,0006055
8	-0,002751	0,002533	0,0006826
9	-0,002459	0,002517	0,0006846
10	-0,002784	0,002744	0,0007146
<b>Celková statistika</b>			
Průměr	-0,0026421	0,0025185	0,00068114
Medián	-0,0027105	0,002525	0,0006836
Rozptyl	0,0000000628	0,0000001369	0,0000000022



Obrázek 3.10: Výsledek měření pro stav mechanické turbulence stav, zdroj  $\lambda = 850 \text{ nm}$ , experimentální umístění dle obr 3.3.

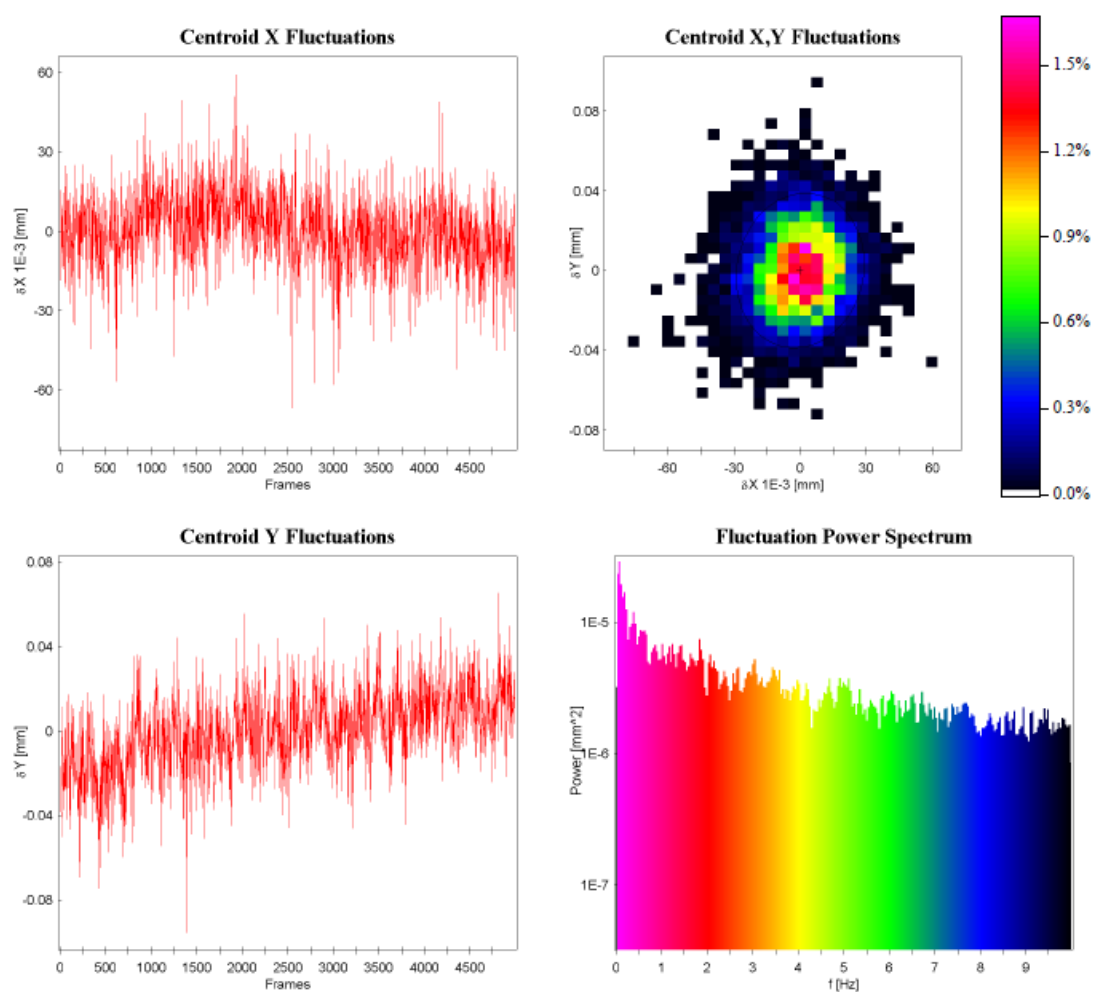


Tabulka 3.11: Výsledná statistika měření pro stav mechanické turbulence, zdroj  $\lambda = 850$  nm, experimentální umístění dle obr 3.3 (Fluktuace na ose  $x$ ).

Měření Osa X	Minimální hodnota fluktuace [mm]	Maximální hodnota fluktuace [mm]	Směrodatná odchylka [deg]
1	-0,002581	0,002822	0,0007628
2	-0,002411	0,00216	0,0006492
3	-0,002386	0,002133	0,0006514
4	-0,002787	0,002496	0,0007025
5	-0,002242	0,002193	0,0006714
6	-0,002891	0,002595	0,0007915
7	-0,002567	0,002561	0,0006698
8	-0,00304	0,003034	0,0009518
9	-0,002225	0,002528	0,0007853
10	-0,002477	0,002583	0,0007079
<b>Celková statistika</b>			
Průměr	-0,0025607	0,0025105	0,00073436
Medián	-0,002522	0,002133	0,0007052
Rozptyl	0,0000000665	0,0000000753	0,0000000078

Tabulka 3.12: Výsledná statistika měření pro stav mechanické turbulence, zdroj  $\lambda = 850$  nm, experimentální umístění dle obr 3.3 (Fluktuace na ose  $y$ ).

Měření Osa Y	Minimální hodnota fluktuace [mm]	Maximální hodnota fluktuace [mm]	Směrodatná odchylka [deg]
1	-0,004431	0,003546	0,001221
2	-0,003837	0,004389	0,001204
3	-0,004378	0,004358	0,001293
4	-0,005241	0,004088	0,001333
5	-0,005307	0,004126	0,001399
6	-0,003798	0,003945	0,00115
7	-0,00502	0,004569	0,001593
8	-0,004254	0,003952	0,001167
9	-0,004463	0,003919	0,00122
10	-0,004102	0,003994	0,001236
<b>Celková statistika</b>			
Průměr	-0,0044831	0,0040886	0,0012816
Medián	-0,0044045	0,004041	0,0012285
Rozptyl	0,0000002640	0,0000000766	0,0000000160



Obrázek 3.11: Výsledek měření pro stav termické turbulence stav, zdroj  $\lambda = 850 \text{ nm}$ , experimentální umístění dle obr 3.3.

Tabulka 3.13: Výsledná statistika měření pro stav termické turbulence, zdroj  $\lambda = 850 \text{ nm}$ , experimentální umístění dle obr 3.3 (Fluktuace na ose  $x$ ).

Měření Osa X	Minimální hodnota fluktuace [mm]	Maximální hodnota fluktuace [mm]	Směrodatná odchylka [deg]
1	-0,001895	0,001766	0,0004968
2	-0,00228	0,001402	0,0004882
3	-0,001923	0,001385	0,0004354
4	-0,001932	0,001635	0,0004691
5	-0,002759	0,002316	0,0008934
6	-0,00205	0,00184	0,0006524
7	-0,002458	0,001982	0,0006565
8	-0,001781	0,002108	0,0005495
9	-0,002886	0,003084	0,0005602
10	-0,002401	0,001993	0,0005976
<b>Celková statistika</b>			
Průměr	-0,0022365	0,0019511	0,00057991
Medián	-0,002165	0,001911	0,00055485
Rozptyl	0,0000001323	0,0000002212	0,0000000160

Tabulka 3.14: Výsledná statistika měření pro stav termické turbulence, zdroj  $\lambda = 850 \text{ nm}$ , experimentální umístění dle obr 3.3 (Fluktuace na ose  $y$ ).

Měření Osa Y	Minimální hodnota fluktuace [mm]	Maximální hodnota fluktuace [mm]	Směrodatná odchylka [deg]
1	-0,002357	0,003124	0,0007129
2	-0,002902	0,002782	0,0006952
3	-0,002714	0,001821	0,0006303
4	-0,002381	0,002865	0,0006494
5	-0,003091	0,002504	0,0007809
6	-0,002275	0,00214	0,0006554
7	-0,002707	0,002155	0,0006055
8	-0,002751	0,002533	0,0006826
9	-0,002459	0,002517	0,0006846
10	-0,002784	0,002744	0,0007146
<b>Celková statistika</b>			
Průměr	-0,0026421	0,0025185	0,00068114
Medián	-0,0027105	0,002525	0,0006836
Rozptyl	0,0000000628	0,0000001369	0,0000000022

Tabulka 3.15: Přehled pro medián směrodatné odchylky na ose  $x$ .

Zdroj / uspořádání	Klidový stav	Mechanická turbulence	Termická turbulence
$\lambda = 850 \text{ nm} / 3.3$	0,001911	0,0007052	0,01513
$\lambda = 850 \text{ nm} / 3.4$	0,00097625	0,0013115	0,021425
$\lambda = 632,8 \text{ nm} / 3.4$	0,0067905	0,00599	0,02407

Tabulka 3.16: Přehled pro medián směrodatné odchylky na ose y.

Zdroj / uspořádání	Klidový stav	Mechanická turbulence	Termická turbulence
$\lambda = 850 \text{ nm} / 3.3$	0,0006836	0,0012285	0,01771
$\lambda = 850 \text{ nm} / 3.4$	0,001053	0,001656	0,020005
$\lambda = 632,8 \text{ nm} / 3.4$	0,0050475	0,0046035	0,025595

Tabulka 3.17: Demonstrace rozdílu pro medián směrodatné odchylky při aktivaci dvou a tří ventilátorů u zdroje  $\lambda = 850 \text{ nm}$ .

Počet termostatů	Osa X	Osa Y
Dva termostaty ze Tří	0,021425	0,020005
Všechny termostaty	0,039205	0,03415

Další statistické údaje jsou v příloze C, veškeré údaje z měření nalezneme na příloze CD.

## 4 Zhodnocení naměřených a vypočtených hodnot z měření

### 4.1 Zhodnocení naměřených výsledků při měření polarizace.

Dle vypracované statistiky v kapitole 3.2.5 a příloze B, lze s jistotou říci, že naměřené výsledky splnily dané předpoklady. Bylo prokázáno, že největší vliv má termická turbulence. Optický svazek ovlivněný termickou turbulencí je opravdu velice nestálý a jeho fluktuace je obrovská. Rozdíl mezi obyčejnou turbulencí a termickou turbulencí je rovněž obrovský. Pro srovnání rozdílů při klidovém stavu a stavu termické turbulence lze říci, že rozdíl je enormní.

Po zhodnocení box-plotu na obr. 3.6 lze vidět, že při měření vzniklo velké množství odlehlých pozorování. Díky tomuto grafu lze s přehledem tyto výkyvy a chyby v měření vyloučit. Tyto chyby vznikly především různými otřesy, chvěním budovy, pohybem po místnosti, kde bylo prováděno měření. Samozřejmě po celou dobu měření byla maximální snaha tyto chyby omezit, ovšem ne vždy se to plně dařilo.

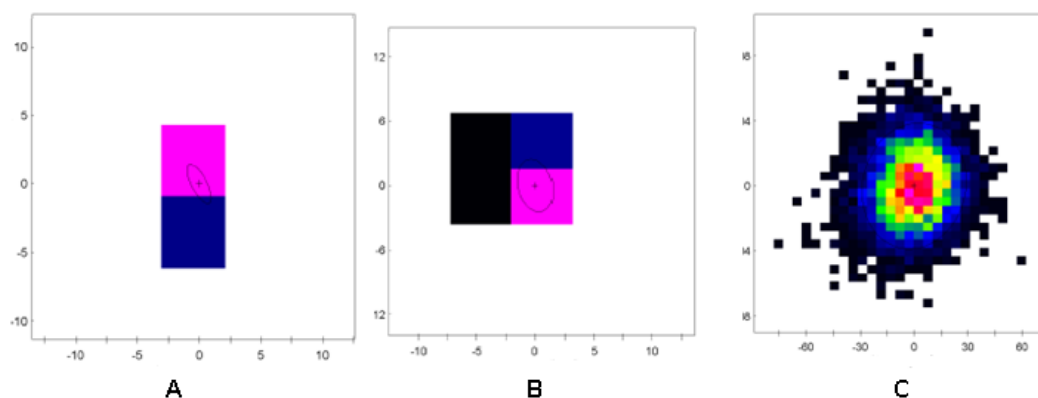
Při zhlédnutí tabulky 3.7 lze pozorovat, jak variační koeficient a směrodatná odchylka se mění s různými atmosférickými vlivy. Zatímco u simulace klidového stavu byl variační koeficient 0,0008 o tomto číslu lze říci, že je malé hodnoty. U simulace mechanické turbulence variační koeficient stoupl na 0,00863 a u termické turbulence dosáhl hodnoty 2,165. Lze tedy vyvodit jasný rozdíl mezi různými atmosférickými vlivy.

Dále je možné porovnávat jednotlivé měření v závislosti na měřicím času. Zajímavé je, že v této kategorii statistiky byly výsledky velmi proměnlivé. Obecně lze po zhodnocení statistiky v příloze B říci, že pro nejvíce typu měření je pro měření klidového stavu doporučeno maximální třicetiminutové měření. Pro stav mechanické a termické turbulence lze považovat za dostatečné měření pětiminutové. Bylo vycházeno z toho hlediska, že při mechanických a termických turbulencích na svazek je potřeba aktivovat ventilátory a ty způsobují otřesy simulační komory. Spousta podobných otřesů v budově a místnosti může s měřením splynout a nelze je ani rozpoznat. Pokud je ovšem měřen klidový stav, okamžitě lze tyto odlehlá pozorování v měření vidět, viz obr. 3.6.

Jako poslední lze zhodnotit, jestli bylo účinnější pro měření experimentální umístění dle obr.3.3 nebo dle obr 3.4. Výsledky byly oproti očekávání rozdílné. Pro klidový stav a zároveň dle grafu 3.10 lze říci, že pro klidový stav bylo experimentální umístění přístrojů dle obr 3.3 lepší. Z přílohy B vyplývá, že u všech srovnávacích tabulek B.7, B.8, B.15, B.16, B.23. a B.24 lze vyvodit závěr, že klidový stav je lepší pro umístění měřicích přístrojů uvnitř komory. Ovšem pro stav termické a mechanické turbulence je lepší mít přístroje venku. Opět lze teoreticky tento výsledek podložit tím důkazem, že na přístroje, pokud jsou uvnitř, působí otřesy aktivovaných ventilátorů, kdežto pokud jsou venku, tyto otřesy na ně nepůsobí, a proto jsou výsledky kvalitnější.

## 4.2 Zhodnocení naměřených výsledků při měření termo-kamerou.

Výstupem tohoto měření byly grafy, ze kterých byly následně zpracovány statistické údaje. První měření bylo provedeno se zdrojem  $\lambda = 850 \text{ nm}$  s výkonem  $5 \text{ mW}$ . Pro tento zdroj byly proměřeny obě experimentální uspořádání. Již od prvního pohledu na grafy lze pozorovat rozdíl mezi jednotlivými stavy. Pro klidový stav jsou hodnoty fluktuace nejmenší. Pokud jsou ovšem aktivovány mechanické turbulence, již se hodnoty zvětšují. Při aktivaci termické turbulence hodnoty razantně dosahují obrovských výšek. Grafické výstupy ukazují nejmenší a největší hodnoty na ose  $x$  a  $y$  pro každou sérii měření. Další zajímavý graf pro určení závěru je graf pro deformaci svazku. Na tomto grafu lze nejvíce vidět termické turbulence, viz obr. 4.1.



Obrázek 4.1: Demonstrace rozdílu deformace svazku mezi klidovým stavem - A, stavem mechanické turbulence - B a stavem termické turbulence - C.

Pro experimentální umístění při tomto měření jsou výsledky překvapivě lepší pro umístění uvnitř, dle obr. 3.3. Pravděpodobně je to dáno tím, že u tohoto měření probíhalo v místnosti a budově méně rušivých vlivů na svazek a měřicí přístroje.

Při tomto měření byl i použit speciální helium-neonový laser, jehož statistické výsledky lze nalézt v příloze C. Grafy jsou součástí CD přílohy. Po zhodnocení výsledků lze pozorovat, větší fluktuace a nepravidelnost pro tento druh laserů. Není to překvapivé, protože jeho výkon je o dva stupně vyšší a dokonce musel být použit šedý filtr. Grafy mají mnohem menší stabilitu, než grafy předešlého zdroje ( $\lambda = 850 \text{ nm}$ ). Rozdíl mezi klidovým stavem, stavem mechanické turbulence a stavem termické turbulence je ovšem i tady zřejmý. Průměr nejnižších a maximálních hodnot fluktuace se u předešlého laseru zhruba o jednom desetinném řádu nižším, a z toho lze vyvodit výsledek o nestabilním svazku tohoto druhu laseru.

Poslední porovnání, které lze provést, je rozdíl mezi aktivací dvou a tří ventilátorů u měření se zdrojem  $850 \text{ nm}$  při termických turbulencích. Podle tabulky 3.17 lze vypočítat, že medián směrodatné odchylky byl nižší pro dva aktivované ventilátory ze tří, a tudíž lze toto měření považovat za účinnější. Proto v ostatních měřeních byly použity na termické turbulence ventilátory dva.

## Závěr

FSO komunikace se používá pro přenos viditelného nebo infračerveného světla, které následně lze přenášet v atmosféře. Pro přenos dat nebo informací většího objemu lze použít optický svazek. Funguje na principu vysílání paprsku mezi vysílací a přijímací stanicí. Rozeznáváme několik druhů optického svazků. Nejznámější je Gaussův svazek. Gaussův svazek je řešen pomocí komplexní amplitudy a pomocí této amplitudy lze definovat jeho vlastnosti. Vlastnosti Gaussova svazku jsou intenzita, výkon, poloměr, divergence a ohnisková hloubka. Gaussův svazek lze rovněž popsat vlnoplochami, což je plocha, na které kmitají body se stejnou fází. Šířit svazek lze například pomocí laseru. Laser je optický oscilátor, který se skládá z rezonančního optického zesilovače, jehož výstupní signál se vrací zpětnou vazbou sfázovaný znovu do vstupu. Laser je popsán vlastnostmi, mezi které patří výkon, spektrální složení, prostorové rozložení světla, polarizace a módová selekce.

Optický svazek lze přenášet atmosférou, atmosféru země lze definovat jako obálku, která obsahuje velkou řadu prvků a sloučenin, především však plynů, které obklopují naši planetu. Atmosféra se skládá z troposféry, stratosféry, mezosféry, termosféry a exosféry. V atmosféře lze pozorovat spoustu atmosférických jevů, jsou to především hydrometeory, litometeory, fotometeory, a elektrometeory. Mezi atmosférické jevy rovněž patří rozptyl a aerosoly. Za zásadní jev vyskytující se v APP lze pokládat turbulence. Atmosférická turbulence může vytvářet nepředvídatelné změny neboli fluktuace. Turbulence je možné rozdělit na termické a mechanické. Mechanické turbulence vznikají díky proudění vzduchu přes překážky, jako jsou stromy, domy apod. Termické turbulence vznikají ohříváním vzduchové vrstvy, která je blízko povrchu naší země. Dalším jevem, který se v naší atmosféře nachází, je polarizace světla. Polarizace je určena směrem vektoru intenzity elektrického pole a jeho závislostí na daném čase. Základní dělení polarizace je na kruhovou, lineární a eliptickou. Ke grafickému zobrazování vývoje polarizace slouží Poincaréova koule. Pro popis míry intenzity optického záření, které je pozorovatelnou a měrnou veličinou se používají Stokesovy vektory. Poincaréova koule umožňuje jak zobrazování vývoje polarizačního stavu. Mezi nejzásadnější patří elipticita a azimut. Pro určení zda světlo je nebo není polarizované, se používá DOP.

Praktická část této práce se zabývala měřením a simulací atmosférických jevů na optický svazek. Byla použita speciální simulační komora, kde byl optický svazek simulován pomocí různých zdrojů laserů. Byla použita dvě různá experimentální uspořádání měřicích přístrojů v simulační komoře. V prvním uspořádání se měřicí přístroje nacházely uvnitř simulační komory, kdežto v druhém případě se nacházely mimo simulační komoru. Jako laserové zdroje byly použity tři zdroje. Každý ze zdrojů pracoval na různé vlnové délce a měl různý pracovní výkon. První část měření se zabývala měření polarizačních vlastností a z těch byly následně určeny atmosférické vlivy, druhá část se zabývala měřením samotného tvaru svazku pomocí termo-kamery Cincam. Měření polarizace probíhala v třech různých časových úsecích. Šlo o pět, patnácti a třicetiminutové měření. Simulovány byly tři různé stavy, šlo o klidový stav, stav mechanické turbulence a stav termické turbulence. Následně bylo provedeno co nejvíce možných kombinací měření pro různé experimentální uspořádání, časové

úseky měření a atmosférické jevy. Nakonec proběhla tvorba explorační analýzy. Pro měření svazku kamerou byl postup podobný, ovšem časový úsek měření nebyl rozdělen do tří různých druhů, ovšem byl pevně daný a to dobou 4 minuty a deset sekund pro každé měření. Rovněž se při tomto měření obměnily zdroje generující optický svazek. Obě experimentální uspořádání se zachovaly a použily i při tomto měření. Opět vzniklo dost kombinací měření pro různé atmosférické jevy. Monitorovalo se chování klidového stavu, stavu mechanické a termické turbulence. Výsledkem tohoto měření byly grafy, z kterých se vytvořila explorační analýza.

Za přínos práce lze označit odhalené vlivy mechanických a termických turbulencí na optický svazek. Dle výsledků této bakalářské práce lze říci, že termická turbulence má na svazek největší vliv. Mnohem menší vliv má turbulence mechanická. Rozdíl mezi klidovým stavem a stavem mechanické turbulence je opět velký a proto lze vyvodit závěr, že atmosférické vlivy mají na šíření optického svazku obrovský vliv. Při měření bylo použito několika grafických znázornění atmosférických jevů. Těchto grafických srovnání lze udělat mnohem více. Přehledným výsledkem jsou ovšem tabulky explorační analýzy, kde je možné pozorovat rozdíly mezi chováním jednotlivých kombinací časových stavů, atmosférických stavů, uspořádání měřicích přístrojů a druhu měření.



---

## Použité zdroje

- [1] WILFERT, Otakar. Optoelektronika: přednášky. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 2002, 121 s. ISBN 80-214-2264-5
- [2] SALEH, Baaha E. Základy fotoniky: Svazek 1. 1. vyd. Překlad Radomir Miroslav Dušek. Praha: MATFYZPRESS, 1994, 226 s. ISBN 80-858-6301-4.
- [3] SALEH, Baaha E. Základy fotoniky: Svazek 2. 1. vyd. Praha: MATFYZPRESS, 1994, 436 s. ISBN 80-858-6302-2.
- [4] SALEH, Baaha E. Základy fotoniky: Svazek 3. 1. vyd. Praha: MATFYZPRESS, 1995, 778 s. ISBN 80-858-6305-7.
- [5] BÁRTA, Miroslav. Vliv atmosférických turbulencí na optický svazek. Brno, 2009. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. Lucie Dordová.
- [6] Huggensův princip, odraz vlnění: Fyzika SŠ. In: [www.realisticky.cz](http://www.realisticky.cz) [online]. [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: [http://www.realisticky.cz/ucebnice/02 Fyzika SŠ/03 Kmitavý pohyb a mechanické vlnění](http://www.realisticky.cz/ucebnice/02_Fyzika_SŠ/03_Kmitavý_pohyb_a_mechanické_vlnění)
- [7] ROUNDY, C. B.: Current Technology of Laser Beam Profile Measurements. [online]. Logan. Dostupný z WWW: <http://aries.ucsd.edu/LMI/TUTORIALS/profile-tutorial.pdf>
- [8] SKŘEHOT, Petr. Atmosférické optické jevy. [online]. s. 34 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: [www.astronomie.cz/download/atmosfericke-opticke-jevy.pdf](http://www.astronomie.cz/download/atmosfericke-opticke-jevy.pdf)
- [9] ŠIŠKA, Petr. Optoelektronika: skriptum [online]. Beta. 27.1.2015 [cit. 2015-04-23]. Dostupné <http://optice.vsb.cz/images/optice/predmety/OPTE/skripta%2027.1.2015%20BETA.pdf>
- [10] Atmosférické jevy: Základní dělení. URSURS COMPANY. <http://www.ursus.cz/> [online]. [cit. 2015-04-23]. Dostupné: [http://www.ursus.cz/pocasi/fotoatlas\\_pocasi/atmosfericke\\_jevy\\_prehled/atmosfericke\\_jev\\_prehled.html](http://www.ursus.cz/pocasi/fotoatlas_pocasi/atmosfericke_jevy_prehled/atmosfericke_jev_prehled.html)
- [11] BASS, Michael and Virenda N. MAHAJAN, Handbook of optics: Atmospheric optics, Modulators, Fiber Optics, X-Ray and Neutron Optics., 3rd ed. New York: McGraw Hill, 2010., 1280 p. ISBN 978-0-07-163313-0
- [12] ŠIŠKA, Petr. Přednáška 1: Optoelektronika. In: <http://comtech.vsb.cz/moodle/> [online]. [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://comtech.vsb.cz/moodle/>
- [13] DVOŘÁK, Filip. Modelování fotonických komponentů v prostředí MATLAB. Brno, 2011. Disertační práce. Univerzita obrany. Vedoucí práce prof. Ing. Čestmír VLČEK, CSc.

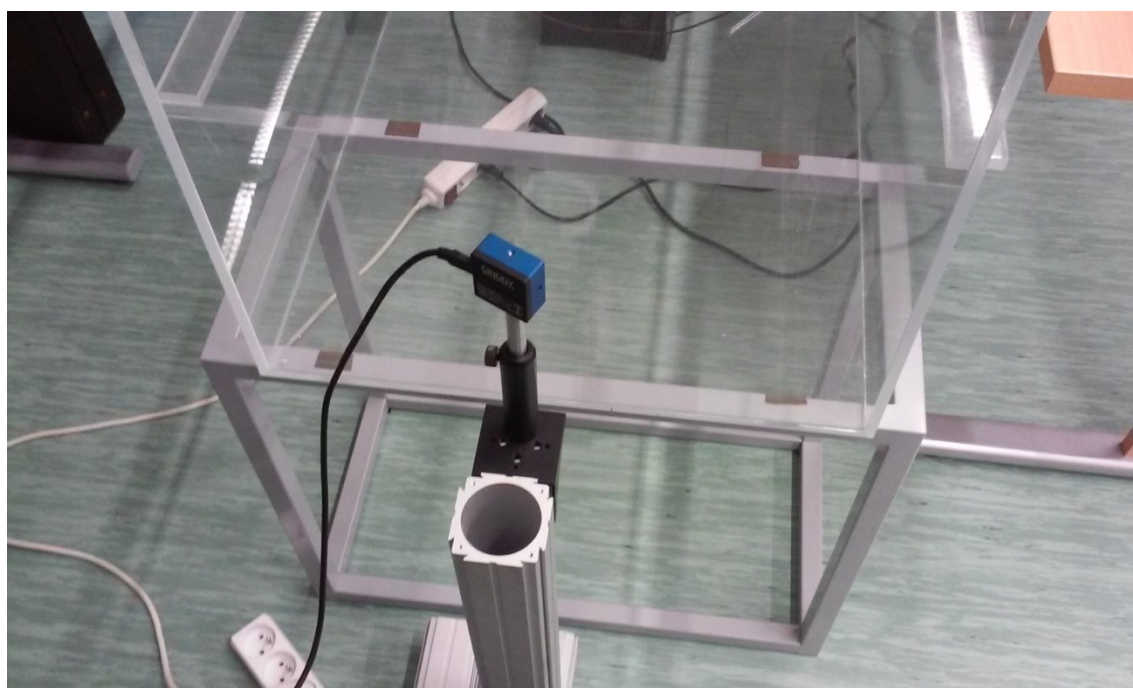
- 
- [14] BEDNÁŘ, Jan, Josef BRECHLER a Vladimír FUKA. Modelování atmosférické turbulence. Wwww.vesmir.cz [online]. září 2012, s. 4 [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: [casopis.vesmir.cz/files/file/fid/7192/aid/9796](http://casopis.vesmir.cz/files/file/fid/7192/aid/9796)
- [15] MACHÁČEK, Ivan. Polarizační stav optické vlny. Brno, 2008. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.
- [16] Thorlabs [online]. 1999 - 2015 [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://www.thorlabs.de/>
- [17] LITSCHMANNOVÁ, Martina. VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. Úvod do statistiky: interaktivní učební text [online]. 2012 [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: [http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/interaktivni\\_uvod\\_do\\_statistiky.pdf](http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/interaktivni_uvod_do_statistiky.pdf)
- [18] BEDÁŇOVÁ, Iveta. Statistika a VÝPOČETNÍ TECHNIKA: Přednáška 1 [online]. [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: <http://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn1/variabil.htm>
- [19] VIS / NIR Laser Beam profiler camera: CinCam CMOS Technical Data. Dostupné z: <http://www.hikari-trading.com/cinogy/file/cincam2110517.pdf>
- [20] HÁJEK, Lukáš. Modelování vlivů okolního prostředí na optický svazek v prostoru. Ostrava, 2013. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava Fakulta elektrotechniky a informatiky Katedra telekomunikační techniky. Vedoucí práce Ing. Jan Látal.
- [21] ANDREWS, Larry C. and Ronald L. PHILLIPS. Laser beam propagation through random media. 2nd ed. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 2005. 775 p. ISBN 0-8194-5948-8
- [22] FSONA: Technology. [online]. [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: [http://www.fsona.com/technology.php?sec=fso\\_guide](http://www.fsona.com/technology.php?sec=fso_guide)
- [23] Free Space Optics (FSO) [online]. [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.lightpointe.com/freespaceoptics.html>

---

## Seznam příloh

- Příloha A: Fotografická dokumentace měřicího pracoviště a přístrojů.  
Příloha B: Souhrn Statistických údajů pro měření polarizace polarimetrem.  
Příloha C: Souhrn Statistických údajů pro měření s termo-kamerou.  
CD příloha: Veškerá naměřená data této bakalářské práce.

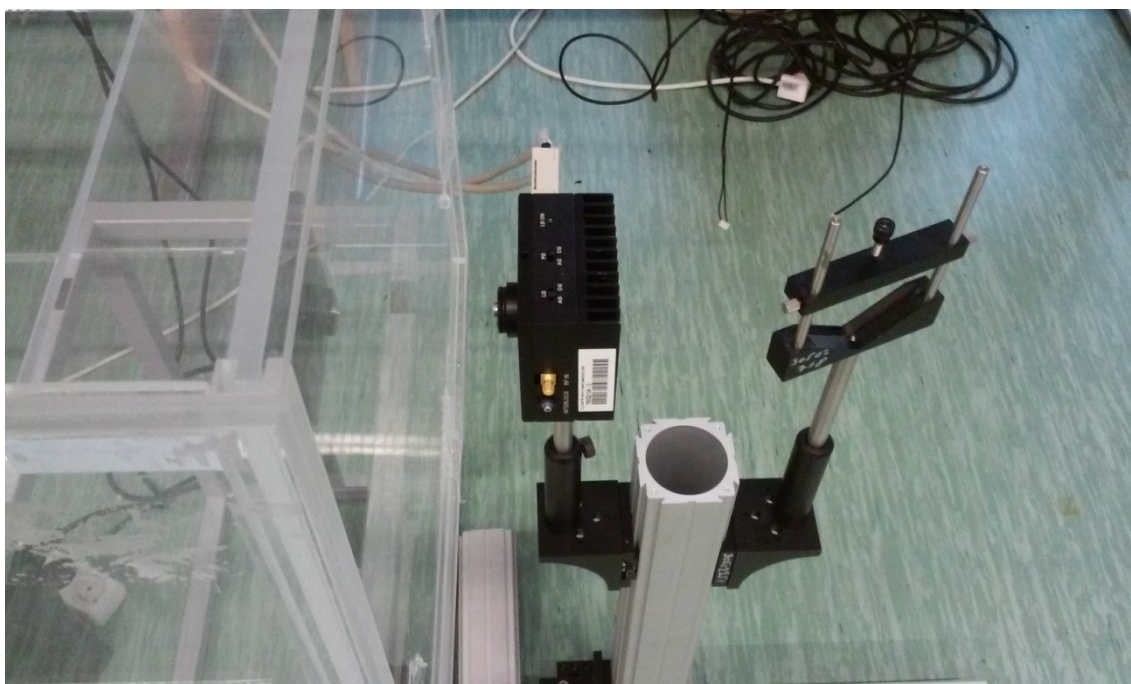
Příloha A: Fotografická dokumentace měřicího pracoviště a přístrojů.



Obrázek A1: Kamera CINCAM



Obrázek A.2: Laser pracující na vlnové délce  $\lambda = 1550 \text{ nm}$  s výkonem  $15 \text{ mW}$ .



Obrázek A.3: Laser pracující na vlnové délce  $\lambda = 850 \text{ nm}$  s výkonem  $5 \text{ mW}$ .



Obrázek A.4: Laser pracující na vlnové délce  $\lambda = 850 \text{ nm}$  s výkonem  $5 \text{ mW}$ . Přední pohled.



Obrázek A.5: Helium-neon laser, pracující na vlnové délce  $\lambda = 634,2 \text{ nm}$  s výkonem  $5 \text{ mW}$ .





Obrázek A.5: Směrovací terč.



Obrázek A.6: Šedé filtry pro helium-neonový laser.

---

Příloha B: Souhrn Statistických údajů pro měření polarizace polarimetrem.

Údaje pro měření dle experimentálního umístění podle obr. 3.3.

Tabulka B.1: Měření 5 minut za klidového stavu - výsledná statistika

	Průměr	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Variační koeficient	Kvantil 0,25	Kvantil 0,5	Kvantil 0,75
Azimut [deg]	0,13365	0,00914	0,00008	0,00008	0,12935	0,13371	0,13816
Elipťicita [deg]	-0,65036	0,01113	0,00012	0,00012	-0,65780	-0,65024	-0,64298
DOP [%]	99,24366	0,04279	0,00183	0,00183	99,21902	99,24382	99,26862

Tabulka B.2: Měření 5 minut za stavu maximální turbulence - výsledná statistika

	Průměr	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Variační koeficient	Kvantil 0,25	Kvantil 0,5	Kvantil 0,75
Azimut [deg]	-0,15139	0,092907	0,00863	0,00863	-0,21422	-0,15029	-0,08851
Elipťicita [deg]	-0,37985	0,184312	0,03397	0,03397	-0,5069	-0,38043	-0,25168
DOP [%]	99,36909	0,560564	0,31423	0,31423	98,97854	99,37126	99,75997

Tabulka B.3: Měření 5 minut, za stavu termické turbulence - výsledná statistika

	Průměr	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Variační koeficient	Kvantil 0,25	Kvantil 0,5	Kvantil 0,75
Azimut [deg]	-1,09139	1,47121	2,16447	2,16447	-2,04689	-1,07113	-0,10738
Elipťicita [deg]	0,98168	1,09110	1,19050	1,19050	0,27510	1,05356	1,73951
DOP [%]	99,14442	6,06703	36,80889	36,80889	95,09483	99,05566	103,16670

Údaje pro měření dle experimentálního umístění podle obr. 3.4.

Tabulka B.4: Měření 5 minut, za klidového stavu - výsledná statistika

	Průměr	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Variační koeficient	Kvantil 0,25	Kvantil 0,5	Kvantil 0,75
Azimut [deg]	0,08256	0,03318	0,00110	0,00110	0,06894	0,08366	0,09749
Elipťicita [deg]	0,95233	0,05420	0,00294	0,00294	0,91963	0,95256	0,98568
DOP [%]	99,51443	0,17249	0,02980	0,02980	99,41347	99,51217	99,61613

Tabulka B.5: Měření 5 minut, za stavu maximální turbulence - výsledná statistika

	Průměr	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Variační koeficient	Kvantil 0,25	Kvantil 0,5	Kvantil 0,75
Azímut [deg]	0,06633	0,02031	0,00041	0,00041	0,05352	0,06639	0,07870
Elipťicita [deg]	0,88618	0,02631	0,00069	0,00069	0,86824	0,88626	0,90411
DOP [%]	99,61261	0,11386	0,01300	0,01300	99,53626	99,61121	99,69004

Tabulka B.6: Měření 5 minut, za stavu termické turbulence - výsledná statistika

	Průměr	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Variační koeficient	Kvantil 0,25	Kvantil 0,5	Kvantil 0,75
Azímut [deg]	0,01174	1,55586	2,42000	2,42000	-1,02471	0,00310	1,03764
Elipťicita [deg]	0,75925	0,71300	0,50800	0,50800	0,28005	0,75892	1,23396
DOP [%]	99,98798	5,82190	33,90000	33,90000	96,07163	99,83712	103,77433

Tabulka B.7: Srovnávací tabulka pro pětiminutové měření dle obr. 3.3.

	Klidový stav		Stav turbulence		Stav termické turbulence	
	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Směrodatná odchylka	Variační koeficient
Azímut [deg]	0,00914	0,00008	0,092907	0,00863	1,47121	2,16447
Elipťicita [deg]	0,01113	0,00012	0,184312	0,03397	1,09110	1,19050
DOP [%]	0,04279	0,00183	0,560564	0,31423	6,06703	36,80889

Tabulka B.8: Srovnávací tabulka pro pětiminutové měření dle obr. 3.4.

	Klidový stav		Stav turbulence		Stav termické turbulence	
	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Směrodatná odchylka	Variační koeficient
Azímut [deg]	0,03318	0,00110	0,02031	0,00041	1,55586	2,42000
Elipťicita [deg]	0,05420	0,00294	0,02631	0,00069	0,71300	0,50800
DOP [%]	0,17249	0,02980	0,11386	0,01300	5,82190	33,90000



Údaje pro měření dle experimentálního umístění podle obr. 3.3.

Tabulka B.9: Měření 15 minut, za klidového stavu - výsledná statistika

	Průměr	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Variační koeficient	Kvantil 0,25	Kvantil 0,5	Kvantil 0,75
Azimut [deg]	0,11928	0,01066	0,00011	0,00011	0,11306	0,11955	0,12644
Elipticita [deg]	-0,61254	0,01842	0,00034	0,00034	-0,62666	-0,61295	-0,59892
DOP [%]	99,28321	0,04427	0,00196	0,00196	99,25866	99,28236	99,30637

Tabulka B.10: Měření 15 minut, za stavu maximální turbulence - výsledná statistika

	Průměr	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Variační koeficient	Kvantil 0,25	Kvantil 0,5	Kvantil 0,75
Azimut [deg]	-0,14269	0,09359	0,00876	0,00876	-0,20585	-0,14192	-0,07877
Elipticita [deg]	-0,37739	0,18555	0,03443	0,03443	-0,50732	-0,37588	-0,24759
DOP [%]	99,39619	0,56397	0,31806	0,31806	99,00322	99,39700	99,78793

Tabulka B.11: Měření 15 minut, za stavu termické turbulence - výsledná statistika

	Průměr	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Variační koeficient	Kvantil 0,25	Kvantil 0,5	Kvantil 0,75
Azimut [deg]	-0,71275	1,57907	2,49346	2,49346	-1,75336	-0,69889	0,33992
Elipticita [deg]	0,79346	1,40647	1,97817	1,97817	-0,07387	0,92794	1,77764
DOP [%]	98,72136	7,06303	49,88634	49,88634	93,92120	98,59219	103,34470

Údaje pro měření dle experimentálního umístění podle obr. 3.4.

Tabulka B.12: Měření 15 minut, za klidového stavu - výsledná statistika

	Průměr	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Variační koeficient	Kvantil 0,25	Kvantil 0,5	Kvantil 0,75
Azimut [deg]	0,13328	0,04331	0,00188	0,00188	0,08986	0,15533	0,16709
Elipticita [deg]	0,99612	0,04077	0,00166	0,00166	0,97361	1,00148	1,01823
DOP [%]	99,55046	0,12504	0,01560	0,01560	99,50574	99,55139	99,59602

Tabulka B.13: Měření 15 minut, za stavu maximální turbulence - výsledná statistika

	Průměr	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Variační koeficient	Kvantil 0,25	Kvantil 0,5	Kvantil 0,75
Azimut [deg]	0,07250	0,02177	0,00047	0,00047	0,05901	0,07228	0,08581
Elipticita [deg]	0,89362	0,02689	0,00072	0,00072	0,87504	0,89377	0,91210
DOP [%]	99,60421	0,11738	0,01380	0,01380	99,52573	99,60424	99,68314

Tabulka B.14: Měření 15 minut, za stavu termické turbulence - výsledná statistika

	Průměr	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Variační koeficient	Kvantil 0,25	Kvantil 0,5	Kvantil 0,75
Azimut [deg]	0,10177	1,54451	2,39000	2,39000	-0,93339	0,11552	1,13777
Elipticita [deg]	0,79549	0,70554	0,49800	0,49800	0,32566	0,79499	1,26575
DOP [%]	99,91600	5,72949	32,80000	32,80000	96,00787	99,79439	103,65435

Tabulka B.15: Srovnávací tabulka pro patnáctiminutové měření dle obr. 3.3.

	Klidový stav		Stav turbulence		Stav termické turbulence	
	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Směrodatná odchylka	Variační koeficient
Azimut [deg]	0,01066	0,00011	0,09359	0,00876	1,57907	2,49346
Elipticita [deg]	0,01842	0,00034	0,18555	0,03443	1,40647	1,97817
DOP [%]	0,04427	0,00196	0,56397	0,31806	7,06303	49,88634

Tabulka B.16: Srovnávací tabulka pro patnáctiminutové měření dle obr. 3.4.

	Klidový stav		Stav turbulence		Stav termické turbulence	
	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Směrodatná odchylka	Variační koeficient
Azimut [deg]	0,04331	0,00188	0,02177	0,00047	1,54451	2,39000
Elipticita [deg]	0,04077	0,00166	0,02689	0,00072	0,70554	0,49800
DOP [%]	0,12504	0,01560	0,11738	0,01380	5,72949	32,80000

Údaje pro měření dle experimentálního umístění podle obr. 3.3.

Tabulka B.17: Měření 30 minut, za klidového stavu - výsledná statistika

	Průměr	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Variační koeficient	Kvantil 0,25	Kvantil 0,5	Kvantil 0,75
Azimut [deg]	0,02466	0,00860	0,00007	0,00007	0,01909	0,02364	0,02905
Elipticita [deg]	-0,53218	0,01857	0,00034	0,00034	-0,54666	-0,53014	-0,51616
DOP [%]	99,21067	0,03342	0,00112	0,00112	99,19133	99,21163	99,23041

Tabulka B.18: Měření 30 minut, za stavu maximální turbulence - výsledná statistika

	Průměr	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Variační koeficient	Kvantil 0,25	Kvantil 0,5	Kvantil 0,75
Azímút [deg]	0,00318	0,13062	0,01706	0,01706	-0,08773	-0,00638	0,08501
Elíptícíta [deg]	-0,45885	0,22200	0,04928	0,04928	-0,60290	-0,45009	-0,30455
DOP [%]	99,46799	0,66068	0,43650	0,43650	99,02944	99,47709	99,91719

Tabulka B.19: Měření 30 minut, za stavu termické turbulence - výsledná statistika

	Průměr	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Variační koeficient	Kvantil 0,25	Kvantil 0,5	Kvantil 0,75
Azímút [deg]	-0,49662	1,52499	2,32560	2,32560	-1,50054	-0,48198	0,51634
Elíptícíta [deg]	0,69694	1,45613	2,12031	2,12031	-0,22361	0,83190	1,72589
DOP [%]	98,12478	6,88865	47,45346	47,45346	93,39979	97,95397	102,66443

Údaje pro měření dle experimentálního umístění podle obr. 3.4.

Tabulka B.20: Měření 30 minut, za klidového stavu - výsledná statistika

	Průměr	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Variační koeficient	Kvantil 0,25	Kvantil 0,5	Kvantil 0,75
Azímút [deg]	0,10140	0,02537	0,00064	0,00064	0,08421	0,10065	0,11665
Elíptícíta [deg]	0,95162	0,04130	0,00171	0,00171	0,92595	0,94762	0,97293
DOP [%]	99,54437	0,11018	0,01210	0,01210	99,48167	99,54591	99,60858

Tabulka B.21: Měření 30 minut, za stavu maximální turbulence - výsledná statistika

	Průměr	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Variační koeficient	Kvantil 0,25	Kvantil 0,5	Kvantil 0,75
Azímút [deg]	0,08626	0,02305	0,00053	0,00053	0,07329	0,08681	0,09966
Elíptícíta [deg]	0,92923	0,03117	0,00097	0,00097	0,90856	0,93019	0,95073
DOP [%]	99,57195	0,12185	0,01480	0,01480	99,49248	99,57104	99,65009

Tabulka B.22: Měření 30 minut, za stavu termické turbulence - výsledná statistika

	Průměr	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Variační koeficient	Kvantil 0,25	Kvantil 0,5	Kvantil 0,75
Azímút [deg]	0,09801	1,48271	2,20000	2,20000	-0,89153	0,10423	1,09463
Elíptícíta [deg]	0,80615	0,67319	0,45300	0,45300	0,35628	0,80625	1,25524
DOP [%]	99,76107	5,50118	30,30000	30,30000	96,05352	99,63881	103,37778

Tabulka B.23: Srovnávací tabulka pro třicetiminutové měření dle obr. 3.3.

	Klidový stav		Stav turbulence		Stav termické turbulence	
	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Směrodatná odchylka	Variační koeficient
Azimut [deg]	0,00860	0,00007	0,13062	0,01706	1,52499	2,32560
Elipticita [deg]	0,01857	0,00034	0,22200	0,04928	1,45613	2,12031
DOP [%]	0,03342	0,00112	0,66068	0,43650	6,88865	47,45346

Tabulka B.24: Srovnávací tabulka pro třicetiminutové měření dle obr. 3.4.

	Klidový stav		Stav turbulence		Stav termické turbulence	
	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Směrodatná odchylka	Variační koeficient
Azimut [deg]	0,02537	0,00064	0,02305	0,00053	1,48271	2,20000
Elipticita [deg]	0,04130	0,00171	0,03117	0,00097	0,67319	0,45300
DOP [%]	0,11018	0,01210	0,12185	0,01480	5,50118	30,30000

Příloha C: Souhrn Statistických údajů pro měření s termo-kamerou.

Tabulka C.1: Výsledná statistika měření pro klidový stav, zdroj  $\lambda = 850$  nm, experimentální umístění dle obr 3.3. (Fluktuace na ose  $x$ ).

Měření Osa X	Minimální hodnota fluktuace [mm]	Maximální hodnota fluktuace [mm]	Směrodatná odchylka [deg]
1	-0,001895	0,001766	0,0004968
2	-0,00228	0,001402	0,0004882
3	-0,001923	0,001385	0,0004354
4	-0,001932	0,001635	0,0004691
5	-0,002759	0,002316	0,0008934
6	-0,00205	0,00184	0,0006524
7	-0,002458	0,001982	0,0006565
8	-0,001781	0,002108	0,0005495
9	-0,002886	0,003084	0,0005602
10	-0,002401	0,001993	0,0005976
<b>Celková statistika</b>			
Průměr	-0,0022365	0,0019511	0,00057991
Medián	-0,002165	0,001911	0,00055485
Rozptyl	0,0000001323	0,0000002212	0,0000000160

Tabulka C.2: Výsledná statistika měření pro klidový stav, zdroj  $\lambda = 850$  nm, experimentální umístění dle obr 3.3. (Fluktuace na ose  $y$ ).

Měření Osa Y	Minimální hodnota fluktuace [mm]	Maximální hodnota fluktuace [mm]	Směrodatná odchylka [deg]
1	-0,002357	0,003124	0,0007129
2	-0,002902	0,002782	0,0006952
3	-0,002714	0,001821	0,0006303
4	-0,002381	0,002865	0,0006494
5	-0,003091	0,002504	0,0007809
6	-0,002275	0,00214	0,0006554
7	-0,002707	0,002155	0,0006055
8	-0,002751	0,002533	0,0006826
9	-0,002459	0,002517	0,0006846
10	-0,002784	0,002744	0,0007146
<b>Celková statistika</b>			
Průměr	-0,0026421	0,0025185	0,00068114
Medián	-0,0027105	0,002525	0,0006836
Rozptyl	0,0000000628	0,0000001369	0,0000000022

Tabulka C.3: Výsledná statistika měření pro stav mechanické turbulence, zdroj  $\lambda = 850$  nm, experimentální umístění dle obr 3.3 (Fluktuace na ose  $x$ ).

Měření Osa X	Minimální hodnota fluktuace [mm]	Maximální hodnota fluktuace [mm]	Směrodatná odchylka [deg]
1	-0,002581	0,002822	0,0007628
2	-0,002411	0,00216	0,0006492
3	-0,002386	0,002133	0,0006514
4	-0,002787	0,002496	0,0007025
5	-0,002242	0,002193	0,0006714
6	-0,002891	0,002595	0,0007915
7	-0,002567	0,002561	0,0006698
8	-0,00304	0,003034	0,0009518
9	-0,002225	0,002528	0,0007853
10	-0,002477	0,002583	0,0007079
<b>Celková statistika</b>			
Průměr	-0,0025607	0,0025105	0,00073436
Medián	-0,002522	0,002133	0,0007052
Rozptyl	0,0000000665	0,0000000753	0,0000000078

Tabulka C.4: Výsledná statistika měření pro stav mechanické turbulence, zdroj  $\lambda = 850$  nm, experimentální umístění dle obr 3.3 (Fluktuace na ose  $y$ ).

Měření Osa Y	Minimální hodnota fluktuace [mm]	Maximální hodnota fluktuace [mm]	Směrodatná odchylka [deg]
1	-0,004431	0,003546	0,001221
2	-0,003837	0,004389	0,001204
3	-0,004378	0,004358	0,001293
4	-0,005241	0,004088	0,001333
5	-0,005307	0,004126	0,001399
6	-0,003798	0,003945	0,00115
7	-0,00502	0,004569	0,001593
8	-0,004254	0,003952	0,001167
9	-0,004463	0,003919	0,00122
10	-0,004102	0,003994	0,001236
<b>Celková statistika</b>			
Průměr	-0,0044831	0,0040886	0,0012816
Medián	-0,0044045	0,004041	0,0012285
Rozptyl	0,0000002640	0,0000000766	0,0000000160

Tabulka C.5: Výsledná statistika měření pro stav termické turbulence, zdroj  $\lambda = 850 \text{ nm}$ , experimentální umístění dle obr 3.3 (Fluktuace na ose  $x$ ).

Měření Osa X	Minimální hodnota fluktuace [mm]	Maximální hodnota fluktuace [mm]	Směrodatná odchylka [deg]
1	-0,0762	0,05912	0,01455
2	-0,08171	0,06022	0,01523
3	-0,0822	0,05369	0,01561
4	-0,07528	0,04956	0,01435
5	-0,07373	0,04756	0,01487
6	-0,07483	0,08193	0,01447
7	-0,08222	0,05566	0,0152
8	-0,07256	0,05284	0,01528
9	-0,08627	0,05307	0,01541
10	-0,07616	0,05471	0,01506
<b>Celková statistika</b>			
Průměr	-0,078116	0,056836	0,015003
Medián	-0,07618	0,0542	0,01513
Rozptyl	0,0000189370	0,0000831312	0,0000001638

Tabulka C.6: Výsledná statistika měření pro stav termické turbulence, zdroj  $\lambda = 850 \text{ nm}$ , experimentální umístění dle obr 3.3 (Fluktuace na ose  $y$ ).

Měření Osa Y	Minimální hodnota fluktuace [mm]	Maximální hodnota fluktuace [mm]	Směrodatná odchylka [deg]
1	-0,09549	0,07419	0,01941
2	-0,0828	0,06141	0,01724
3	-0,07363	0,07764	0,01717
4	-0,09305	0,07601	0,01788
5	-0,06699	0,06932	0,01697
6	-0,06224	0,07984	0,01781
7	-0,07447	0,07345	0,01971
8	-0,09912	0,07898	0,01823
9	-0,08357	0,07435	0,01761
10	-0,06068	0,07805	0,01718
<b>Celková statistika</b>			
Průměr	-0,079204	0,074324	0,017921
Medián	-0,078635	0,07518	0,01771
Rozptyl	0,0001719164	0,0000272420	0,0000008105

Tabulka C.7: Výsledná statistika měření, klidový stav, zdroj  $\lambda = 850$  nm, experimentální umístění dle obr 3.4 (Fluktuace na ose  $x$ ).

Měření Osa X	Minimální hodnota fluktuace [mm]	Maximální hodnota fluktuace [mm]	Směrodatná odchylka [deg]
1	-0,004286	0,00353	0,0008776
2	-0,005067	0,003435	0,0009995
3	-0,00485	0,003153	0,0009733
4	-0,003432	0,003875	0,0009399
5	-0,004215	0,00279	0,0008179
6	-0,003289	0,002259	0,000841
7	-0,003909	0,004322	0,0009883
8	-0,003412	0,004877	0,0009895
9	-0,003463	0,004337	0,001098
10	-0,003941	0,003115	0,0009792
<b>Celková statistika</b>			
Průměr	-0,0039864	0,0035693	0,00095042
Medián	-0,003925	0,0034825	0,00097625
Rozptyl	0,0000003461	0,0000005683	0,0000000063

Tabulka C.8: Výsledná statistika měření, klidový stav, zdroj  $\lambda = 850$  nm, experimentální umístění dle obr 3.4 (Fluktuace na ose  $y$ ).

Měření Osa Y	Minimální hodnota fluktuace [mm]	Maximální hodnota fluktuace [mm]	Směrodatná odchylka [deg]
1	-0,004136	0,003919	0,001165
2	-0,003965	0,004708	0,001174
3	-0,00413	0,003644	0,0009435
4	-0,003251	0,003551	0,0009035
5	-0,003512	0,004205	0,000924
6	-0,003745	0,003852	0,000995
7	-0,003393	0,004251	0,001025
8	-0,00445	0,003485	0,001116
9	-0,003995	0,003613	0,001173
10	-0,003422	0,003728	0,001081
<b>Celková statistika</b>			
Průměr	-0,0037999	0,0038956	0,00105
Medián	-0,003855	0,00379	0,001053
Rozptyl	0,0000001405	0,0000001343	0,0000000101



Tabulka C.9: Výsledná statistika, stav mechanické turbulence zdroj  $\lambda = 850 \text{ nm}$ , experimentální umístění dle obr 3.4 (Fluktuace na ose  $x$ ).

Měření Osa X	Minimální hodnota fluktuace [mm]	Maximální hodnota fluktuace [mm]	Směrodatná odchylka [deg]
1	-0,006777	0,005349	0,001853
2	-0,004928	0,00556	0,001635
3	-0,004849	0,004792	0,001715
4	-0,005526	0,004301	0,001552
5	-0,004319	0,003346	0,001071
6	-0,005044	0,003734	0,001028
7	-0,005241	0,005398	0,001574
8	-0,004236	0,003704	0,0009735
9	-0,005023	0,003495	0,0009805
10	-0,003661	0,003588	0,0009625
<b>Celková statistika</b>			
Průměr	-0,0049604	0,0043267	0,00133445
Medián	-0,0049755	0,0040175	0,0013115
Rozptyl	0,0000006348	0,0000006869	0,0000001166

Tabulka C.10: Výsledná statistika, stav mechanické turbulence zdroj  $\lambda = 850 \text{ nm}$ , experimentální umístění dle obr 3.4 (Fluktuace na ose  $y$ ).

Měření Osa Y	Minimální hodnota fluktuace [mm]	Maximální hodnota fluktuace [mm]	Směrodatná odchylka [deg]
1	-0,01278	0,01073	0,003659
2	-0,009323	0,009667	0,003281
3	-0,009207	0,01018	0,003152
4	-0,009367	0,01033	0,003312
5	-0,005145	0,006336	0,001604
6	-0,004828	0,005416	0,001567
7	-0,005748	0,006176	0,001708
8	-0,006264	0,005681	0,001574
9	-0,005991	0,005704	0,001576
10	-0,004893	0,00532	0,001554
<b>Celková statistika</b>			
Průměr	-0,0073546	0,007554	0,0022987
Medián	-0,0061275	0,006256	0,001656
Rozptyl	0,0000063746	0,0000049029	0,0000007539

Tabulka C.11: Výsledná statistika, stav termické turbulence zdroj  $\lambda = 850$  nm, experimentální umístění dle obr 3.4 (Fluktuace na ose x). Dva termostaty ze tří aktivovány.

Měření Osa X	Minimální hodnota fluktuace [mm]	Maximální hodnota fluktuace [mm]	Směrodatná odchylka [deg]
1	-0,1159	0,09478	0,02443
2	-0,1315	0,1	0,02438
3	-0,09251	0,1004	0,02328
4	-0,1169	0,09844	0,0226
5	-0,09737	0,07522	0,02184
6	-0,09891	0,08811	0,02101
7	-0,08302	0,08449	0,02066
8	-0,1092	0,09153	0,02071
9	-0,08837	0,08387	0,02069
10	-0,08823	0,08198	0,02015
<b>Celková statistika</b>			
Průměr	-0,102191	0,089882	0,021975
Medián	-0,09814	0,08982	0,021425
Rozptyl	0,0002193620	0,0000658722	0,0000023165

Tabulka C.12: Výsledná statistika, stav termické turbulence zdroj  $\lambda = 850$  nm, experimentální umístění dle obr 3.4 (Fluktuace na ose y). Dva termostaty ze tří aktivovány.

Měření Osa Y	Minimální hodnota fluktuace [mm]	Maximální hodnota fluktuace [mm]	Směrodatná odchylka [deg]
1	-0,09914	0,09786	0,02391
2	-0,09485	0,08459	0,02274
3	-0,08485	0,08902	0,02158
4	-0,0826	0,08225	0,0207
5	-0,06903	0,07858	0,0203
6	-0,09129	0,08039	0,01971
7	-0,07683	0,08712	0,01941
8	-0,09058	0,08376	0,01908
9	-0,08641	0,08047	0,0193
10	-0,08019	0,08608	0,01891
<b>Celková statistika</b>			
Průměr	-0,085577	0,085012	0,020564
Medián	-0,08563	0,084175	0,020005
Rozptyl	0,0000717030	0,0000279457	0,0000025648

Tabulka C.13: Výsledná statistika, stav termické turbulence zdroj  $\lambda = 850$  nm, experimentální umístění dle obr 3.4 (Fluktuace na ose x). Všechny termostaty aktivovány.

Měření Osa X	Minimální hodnota fluktuace [mm]	Maximální hodnota fluktuace [mm]	Směrodatná odchylka [deg]
1	-0,1293	0,175	0,03914
2	-0,1453	0,1592	0,03906
3	-0,1341	0,1685	0,04098
4	-0,1324	0,147	0,03927
5	-0,1361	0,1958	0,04076
6	-0,1581	0,16	0,03863
7	-0,1359	0,1839	0,04012
8	-0,1346	0,1492	0,04014
9	-0,1553	0,1981	0,03831
10	-0,1227	0,2173	0,03869
<b>Celková statistika</b>			
Průměr	-0,13838	0,1754	0,03951
Medián	-0,13525	0,17175	0,039205
Rozptyl	0,0001131076	0,0004799680	0,0000007776

Tabulka C.14: Výsledná statistika, stav termické turbulence zdroj  $\lambda = 850$  nm, experimentální umístění dle obr 3.4 (Fluktuace na ose y). Všechny termostaty aktivovány.

Měření Osa Y	Minimální hodnota fluktuace [mm]	Maximální hodnota fluktuace [mm]	Směrodatná odchylka [deg]
1	-0,145	0,1181	0,03418
2	-0,1351	0,1071	0,03412
3	-0,1328	0,1268	0,0338
4	-0,1585	0,114	0,03323
5	-0,143	0,1067	0,03345
6	-0,151	0,1294	0,03317
7	-0,1514	0,1152	0,03542
8	-0,1507	0,1079	0,0348
9	-0,1373	0,1327	0,03471
10	-0,162	0,1212	0,0346
<b>Celková statistika</b>			
Průměr	-0,14668	0,11791	0,034148
Medián	-0,14785	0,11665	0,03415
Rozptyl	0,0000862616	0,0000806009	0,0000004973

Tabulka C.15: Výsledná statistika, klidový stav, zdroj  $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ , experimentální umístění dle obr 3.4 (Fluktuace na ose  $x$ ).

Měření Osa X	Minimální hodnota fluktuace [mm]	Maximální hodnota fluktuace [mm]	Směrodatná odchylka [deg]
1	-0,02812	0,01951	0,007655
2	-0,03443	0,01772	0,006702
3	-0,03238	0,04494	0,01281
4	-0,0166	0,0167	0,007785
5	-0,0161	0,01179	0,005102
6	-0,02257	0,01447	0,006472
7	-0,03129	0,05432	0,008567
8	-0,01463	0,01998	0,006879
9	-0,01066	0,02205	0,003123
10	-0,01542	0,02549	0,00398
<b>Celková statistika</b>			
Průměr	-0,02222	0,024697	0,0069075
Medián	-0,019585	0,019745	0,0067905
Rozptyl	0,0000676028	0,0001727904	0,0000065307

Tabulka C.16: Výsledná statistika, klidový stav, zdroj  $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ , experimentální umístění dle obr 3.4 (Fluktuace na ose  $y$ ).

Měření Osa Y	Minimální hodnota fluktuace [mm]	Maximální hodnota fluktuace [mm]	Směrodatná odchylka [deg]
1	-0,009051	0,01863	0,004965
2	-0,01551	0,02052	0,006173
3	-0,01468	0,04137	0,006674
4	-0,009258	0,008854	0,004183
5	-0,01111	0,01382	0,004176
6	-0,02171	0,01989	0,005972
7	-0,01013	0,06301	0,006507
8	-0,01134	0,01278	0,004027
9	-0,01496	0,01767	0,00513
10	-0,01884	0,01797	0,004053
<b>Celková statistika</b>			
Průměr	-0,0136589	0,0234514	0,005186
Medián	-0,01301	0,0183	0,0050475
Rozptyl	0,0000162754	0,0002413679	0,0000010256

Tabulka C.17: Výsledná statistika, stav mechanické turbulence, zdroj  $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ , experimentální umístění dle obr 3.4 (Fluktuace na ose  $x$ ).

Měření Osa X	Minimální hodnota fluktuace [mm]	Maximální hodnota fluktuace [mm]	Směrodatná odchylka [deg]
1	-0,0107	0,006393	0,002262
2	-0,02538	0,009568	0,003113
3	-0,03187	0,01705	0,005419
4	-0,05621	0,02978	0,005733
5	-0,03084	0,02146	0,004794
6	-0,02437	0,02477	0,006247
7	-0,03977	0,04969	0,008138
8	-0,04778	0,03147	0,008132
9	-0,03921	0,02626	0,008612
10	-0,0547	0,02678	0,008529
<b>Celková statistika</b>			
Průměr	-0,036083	0,0243221	0,0060979
Medián	-0,03554	0,025515	0,00599
Rozptyl	0,0001853164	0,0001334620	0,0000046471

Tabulka C.18: Výsledná statistika, stav mechanické turbulence, zdroj  $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ , experimentální umístění dle obr 3.4 (Fluktuace na ose  $y$ ).

Měření Osa Y	Minimální hodnota fluktuace [mm]	Maximální hodnota fluktuace [mm]	Směrodatná odchylka [deg]
1	-0,009546	0,009694	0,003364
2	-0,01276	0,01706	0,004651
3	-0,01469	0,02312	0,004532
4	-0,01601	0,05101	0,004556
5	-0,03063	0,02319	0,004863
6	-0,01804	0,02679	0,005249
7	-0,026	0,05052	0,005546
8	-0,02518	0,04045	0,006364
9	-0,01575	0,03017	0,003893
10	-0,01582	0,02382	0,004494
<b>Celková statistika</b>			
Průměr	-0,0184426	0,0295824	0,0047512
Medián	-0,015915	0,025305	0,0046035
Rozptyl	0,0000396771	0,0001691962	0,0000006316

Tabulka C.19: Výsledná statistika, stav termické turbulence, zdroj  $\lambda = 632,8$  nm, experimentální umístění dle obr 3.4 (Fluktuace na ose x).

Měření Osa X	Minimální hodnota fluktuace [mm]	Maximální hodnota fluktuace [mm]	Směrodatná odchylka [deg]
1	-0,1183	0,1192	0,02377
2	-0,09791	0,1062	0,02423
3	-0,09877	0,1253	0,0245
4	-0,1049	0,1096	0,02403
5	-0,09361	0,09696	0,02378
6	-0,1087	0,1068	0,02421
7	-0,1328	0,1265	0,02424
8	-0,09846	0,1114	0,02411
9	-0,1065	0,1076	0,02311
10	-0,08822	0,108	0,02402
<b>Celková statistika</b>			
Průměr	-0,104817	0,111756	0,024
Medián	-0,101835	0,1088	0,02407
Rozptyl	0,0001508498	0,0000766746	0,0000001311

Tabulka C.20: Výsledná statistika, stav termické turbulence, zdroj  $\lambda = 632,8$  nm, experimentální umístění dle obr 3.4 (Fluktuace na ose y).

Měření Osa Y	Minimální hodnota fluktuace [mm]	Maximální hodnota fluktuace [mm]	Směrodatná odchylka [deg]
1	-0,1161	0,1061	0,02578
2	-0,1121	0,09848	0,02564
3	-0,124	0,1183	0,02572
4	-0,1242	0,08804	0,02555
5	-0,1186	0,09905	0,02484
6	-0,1073	0,08677	0,02442
7	-0,1404	0,1141	0,02665
8	-0,1062	0,09348	0,02555
9	-0,1141	0,1003	0,02484
10	-0,1211	0,1096	0,02594
<b>Celková statistika</b>			
Průměr	-0,11841	0,101422	0,025493
Medián	-0,11735	0,099675	0,025595
Rozptyl	0,0000891849	0,0001006737	0,0000003705